

# **Detekce poruch asynchronních elektromotorů při kusové zkoušce**

Asynchronous Motors Fault Detection During a Single Test

**Bc. Marek Nebyla**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Martin Soukup

Ostrava 2021

## **Abstrakt**

V první části práce popisují možné poruchy asynchronních motorů, jejich příčiny a důsledky.

V další části se zabývám měřením statorového proudu, vibrací a hluku. U těchto 3 veličin pak uvádím také možnosti diagnostiky vad, podle měření a jak se projevují konstrukční parametry na tyto veličiny.

V praktické části je popsána metodika zpracování dat a vytvoření databáze s ovládacími filtry. Poté je zde popsáno použití dat pro možnosti diagnostických ukazatelů, srovnání nebo nastavení limitů pro další zkoušky.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, kusová zkouška, typová zkouška, Fourierova transformace, diagnostika vibrací, akustická analýza, analýza statorového proudu

## **Abstract**

I describe possible failures of asynchronous motors in the first part of the work, their causes, and consequences.

I deal with the measurement of stator current, vibration and noise in the next part. I also present the possibilities of diagnostics of defects for these three quantities, according to measurements and how the design parameters affect these quantities.

The practical part describes the methodology of data processing and database creation with control filters. Here is described the use of data for the possibility of diagnostic indicators, comparison or setting limits for further tests.

## **Key words**

Induction motor, single test, type test, Fourier transform, diagnostics of vibration, motor current signature analysis

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Martinu Soukupovi a Ing. Petru Bernatovi Ph.D. za odbornou pomoc, cenné rady a připomínky, které mi poskytnul během vypracovávání této práce.

# Obsah

Obsah .....	5
Seznam symbolů a zkratk: .....	6
Seznam obrázků .....	7
Seznam tabulek .....	8
Úvod .....	9
1. Poruchy asynchronních motorů a historie diagnostiky .....	10
1.1. Historie diagnostiky .....	10
1.2. Poruchy asynchronních elektromotorů .....	10
1.2.1. Poruchy statoru .....	11
1.2.2. Poruchy rotoru .....	14
1.3. Poruchy ložisek .....	16
2. Diagnostika a jednotlivé zkoušky .....	17
2.1. Analýza statorového proudu .....	18
2.1.1. Metodiky pro zpracování signálu .....	22
2.1.2. Jednotlivé vady a jejich diagnostika pomocí MCA .....	23
2.2. Vibrodiagnostika .....	27
2.2.1. Snímače signálu .....	29
2.2.2. Příčiny vzniku vibrací a jejich diagnostika: .....	32
2.3. Akustická diagnostika .....	37
3. Typy zkoušek .....	47
3.1. Typová zkouška .....	47
3.2. Kusová zkouška .....	49
4. Zpracování měřených dat .....	51
5. Vytvoření databáze a metodiky vyhodnocení .....	56
Závěr .....	61
Literatura .....	62

## Seznam symbolů a zkratk:

Al	chemická značka hliníku
Cu	chemická značka mědi
Fe	chemická značka železa
Mg	chemická značka manganu
PVC	polyvinylchlorid
AM	asynchronní motor
Nn	nízké napětí
FFT	rychlá Fourierova transformace
kW	kilowatt

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Četnost výskytu poruch indukčních motorů [6].....	11
Obrázek 2 Mezizávitový zkrat [2] .....	12
Obrázek 3: Mezifázový zkrat [2] .....	12
Obrázek 4: Zkrat zemní [2] .....	13
Obrázek 5: Znázornění statické, dynamické a smíšené excentricity [4].....	14
Obrázek 6: Rotor s nedolitou klecí po obrobení [5] .....	15
Obrázek 7: Možnosti cesty ložiskových proudů [3].....	16
Obrázek 8: Schéma diagnostiky [15] .....	17
Obrázek 9: Rozdělení vzorků na sudé a liché: [8].....	20
Obrázek 10: konečné rozdělení [8] .....	21
Obrázek 11: STFT A WT okno [9] .....	22
Obrázek: 12 Volné uložení motoru .....	28
Obrázek 13: Pevné uložení motoru .....	28
Obrázek 14: Snímač [10].....	29
Obrázek 15: Snímač rychlosti kmitavého pohybu [10].....	30
Obrázek 16: Piezoelektrický akcelerometr [10] .....	31
Obrázek 17: Statická nevyváženost [11] .....	32
Obrázek 18: Momentová nevyváženost [11] .....	33
Obrázek 19: Kvazistatická nevyváženost [11] .....	34
Obrázek 20: Dynamická nevyváženost [11] .....	34
Obrázek 21: Ohnutá hřídel [11].....	34
Obrázek 22: Nesouosost hřídelí [11] .....	35
Obrázek 23: Vůle v uložení [11].....	36
Obrázek 24: Deformace statoru [11].....	43
Obrázek 25: Motor při typové zkoušce .....	47
Obrázek 26 Analýza proudu naprázdno .....	49
Obrázek 27: Analýza proudu nakrátko .....	50
Obrázek 28: Příklad Front panelu čtečky formátu stream .....	52
Obrázek 29: Příklad Block panelu čtečky formátu stream .....	52
Obrázek 30: Lineární zobrazení frekvenčního spektra pro záznam 5,10 a 15s. ....	53
Obrázek 31: Logaritmické zobrazení frekvenčního spektra pro záznam 5,10 a 15s .....	54
Obrázek 32: Titulní strana .....	57
Obrázek 33: Konstrukční změna 40-60 Hz zobrazení.....	57
Obrázek 34: Konstrukční změna 0-100 Hz zobrazení.....	57
Obrázek 35: Histogram nesymetrie.....	58
Obrázek 36: Motor s nesymetrií zapojení Y .....	58
Obrázek 37: Motor s nesymetrií zapojení D.....	58
Obrázek 38: Zobrazení rozsahu hodnot poruchových frekvencí.....	59

## Seznam tabulek

Tabulka 1: LEM [7] .....	18
Tabulka 2: IEC 60034-14 .....	27
Tabulka 3: IEC 60034-9 .....	38



## Úvod

Historie asynchronního motoru sahá do 19.století, za jeho objevitele se považuje vědec Nikola Tesla, který si tento vynález nechal v roce 1887 patentovat. V této době se kladl velký důraz na funkčnost stroje a ostatní parametry šly stranou, stroje byly předimenzované, poměr mezi velikostí a výkonem byl mnohem větší, než je tomu teď. Od roku 1887 uběhlo mnoho let a asynchronní motor prošel vývojem, který stále pokračuje. Díky použití nových materiálů a stále propracovanější konstrukci tyto stroje dosahují vysoké účinnosti, více než 96 %. Jednoduchá konstrukce a vysoká životnost jsou jedny z hlavních pozitivních vlastností tohoto stroje, který v dnešní době je nejrozšířenějším elektromotorem na světě.

I přes jednoduchou konstrukci stroje, se můžou vyskytnout poruchy, kterými je potřeba se zabývat, ať už jde o poruchy způsobené nedokonalou výrobou, nebo opotřebením stroje. Výrobní proces a následné předepsané postupy, jsou úspěchem k detekci výrobních i konstrukčních vad. Celá řada měřených veličin, jejich hodnoty jsou stanoveny normami, rozhodnutí, zda produkt splňuje dané normy a může být expedován. Rozšíření diagnostiky ve výrobním procesu je jedna z možných cest k úspěchu, jak detekovat, určit a předcházet problémům ať už výrobním, nebo problémům spojeným s nevhodným návrhem designu stroje. Pokračování v rozšiřování této problematiky je dobrou cestou ke snížení počtu vadných motorů ve výrobě.

# 1. Poruchy asynchronních motorů a historie diagnostiky

## 1.1. Historie diagnostiky

Historii diagnostiky můžeme zažít mapovat od doby, kdy jsi lidé začali všímat abnormálních jevů strojů a jejich predikci. Jako hlavní milníky můžeme stanovit objevení základních principů níže popsaných diagnostických metod. 1975 – FFT, 1641 - teploměr. Diagnostika elektrických strojů započala s nástupem výpočetní techniky v 80. letech minulého století.

V roce 1997 založila IEEE – The Institute of Electrical and Electronic Engineers symposium o diagnostice elektrických strojů. Je to setkání, konající se jednou za 2 roky, které se zabývá speciálně diagnostikou elektrických strojů a pohonů. Kromě tohoto setkání se konají i jiné konference, které mají vyčleněnou speciální část na diagnostiku elektrických strojů a pohonů, je to například nejstarší konference ICEM – International Conference of Electric Machines, nebo PEDS – Power Electronic and Drivers System. [1]

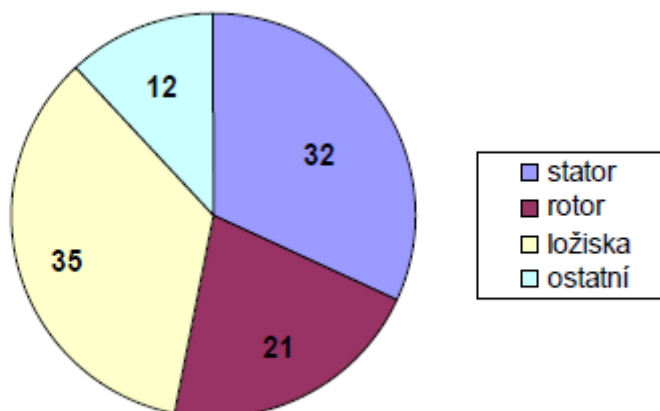
## 1.2. Poruchy asynchronních elektromotorů

I přes jednoduchou konstrukci se objevují u asynchronních elektromotorů řada poruch, kterým je třeba se zabývat. Některé poruchy jsou způsobeny nedodržením technologických postupů výroby nebo nevhodné konstrukční řešení návrhu asynchronního motoru, jiné mohou být způsobeny nadměrným přetěžováním stroje, špatnou údržbou nebo časovou degradací materiálu. Jakákoliv porucha se v jisté míře projeví na chodu elektromotoru například zvýšením oteplení, zvýšení ztrát nebo snížení možného dosažitelného výkonu. Tyto poruchy můžeme rozdělit na poruchy mechanické a poruchy aktivních částí.

Poruchy asynchronního stroje dle konstrukce:

- Poruchy statoru
- Poruchy rotoru
- Poruchy ložisek

Asynchronní motor se skládá se stacionární části – statoru a pohyblivé/rotující části rotoru. Stator dále tvoří kostra, která může být odlitá z litiny nebo oceli, nebo může být svařovaná, dále z magnetického obvodu tvořeného z elektrotechnických plechů zalisovaných do kostry, ložiskových štítů a svorkovnice. Rotor je tvořen taktéž z rotorových plechů, jejich středem prochází hřídel, může být vinutý nebo odlitý. Obě tyto části jsou spojeny přes ložiska.



Obrázek 1: Četnost výskytu poruch indukčních motorů [6]

### 1.2.1. Poruchy statoru

Mezi hlavní 3 nejčastější poruchy patří poruchy statoru, hlavní příčinou těchto poruch je porucha vinutí, konkrétně porušení izolace. Tato izolace je při provozu namáhána jak tepelně, tak elektricky. Na výše uvedené namáhání je izolace nadimenzována, proto nesprávná volba izolace může zapříčinit snížení životnosti stroje či předčasnou destrukci. Izolace se volí podle teplotní třídy a napěťové odolnosti. Zejména u provozu s využitím frekvenčních měničů a softstartérů je potřeba počítat, že napěťové špičky dosahují vyšších hodnot než v případě provozu, kdy motor je napájen harmonickým napětím sítě. K poruše může taky dojít vlivem mechanického původu, tyto poruchy jsou méně časté a může k nim dojít např. kvůli uvolnění klínu, kterým je zaklíněno vinutí v drážce.

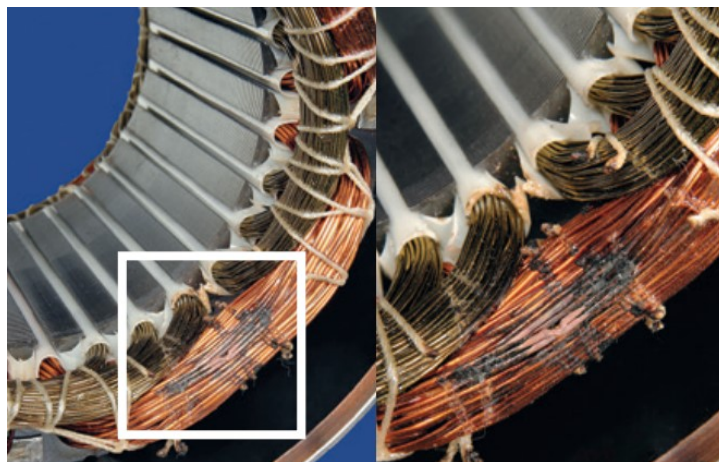
#### Zkrat statorového vinutí

Zkraty statorového vinutí můžeme rozdělit na 3 druhy:

- Zkrat mezizávitový
- Zkrat mezifázový
- Zkrat zemní
- Zkrat mezi plechy

### Zkrat mezizávitový

Tento typ zkratu nastane při narušení izolace jednotlivých vodičů, které jsou v praxi u nízkonapěťových asynchronních elektromotorů izolovány lakem. V jiných aplikacích můžeme objevit izolační materiály jako například smalt, PVC aj. Na tento typ zkratu můžeme nahlížet jako na zkrat nakrátko, neboť vzniká mezi vodiči jedné fáze a protéká jím velký proud.



Obrázek 2 Mezizávitový zkrat [2]

### Zkrat mezifázový

Mezifázový zkrat je takový, kde se spojí vodiče jedné fáze s fází sousední. Tento typ zkratu je způsoben špatnou mezifázovou izolací.



Obrázek 3: Mezifázový zkrat [2]

## **Zkrat zemní**

Zkrat zemní vzniká při poškození drážkové izolace, je to vodivé spojení vinutí s uzemněným statorovým svazkem plechů. Proud se uzavírá přes zem a vzniká velká proudová nesymetrie při níž neplatí součet okamžitých hodnot proudů fází.



*Obrázek 4: Zkrat zemní [2]*

## **Zkrat mezi plechy**

Elektrotechnické plechy rozdělujeme na orientované a neorientované. Kvůli rotaci magnetického pole se pro elektromotory používá neorientovaný magnetický plech. Magnetický plech je kvůli snížení ztrát vířivými proudy izolován křemíkem. Při porušení této izolace se začne motor lokálně přehřívat v místě porušené izolace, toto porušení je nejčastěji způsobeno špatným zacházením s plechem.

## **Zvýšený přechodový odpor**

Při zvýšeném přechodovém odporu se začne místo lokálně přehřívat. Tento jev je způsoben špatným provedením spoje, např. u lisování kabelových ok, nebo u spoje paralelních skupin cívek. Spoj se provádí lisováním nebo pájením např. slitinou pájky AgCu.

## **Snížený izolační odpor**

Izolační odpor s postupnou degradací stroje klesá, mezi hlavní urychlovače degradace je tepelné namáhání. Snížení izolačního odporu může být také způsobeno nedokonalou impregnací.

## **Porucha kostry**

Může být způsobena vadou odlitku, kdy patky kostry nejsou v jedné rovině, při montáži pak vzniká pnutí.

### 1.2.2. Poruchy rotoru

#### Excentricita rotoru

Excentricitu neboli výstřednost můžeme rozdělit na dva typy, tím prvním typem je excentricita statická, tyto excentricity mohou být způsobeny vadou ložisek, nebo ustanovením rotoru. Všechny typy excentricity mají za důsledek nestejnou vzduchovou mezeru.

#### Statická excentricita

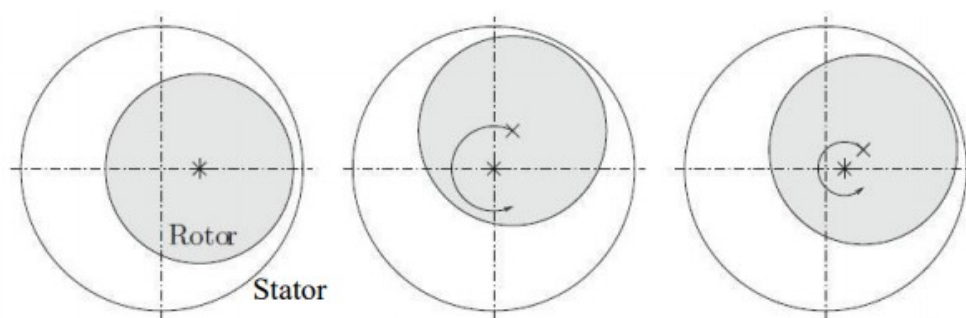
Je vyosení osy rotoru vůči ose statoru. Vzduchová mezera má nestejný charakter, ale místo s nejmenší vzduchovou je v daném bodě, nemá vliv na úhel natočení rotoru.

#### Dynamická excentricita

Je to vychýlení osy rotace rotoru vůči osy středu rotoru. Rotor má osu otáčení stejnou jako osa statoru, ale tato osa není středem rotoru. To má za důsledek nerovnoměrnou vzduchovou mezeru, která mění svůj tvar v závislosti na natočení rotoru. [1][11]

#### Smíšená excentricita

V praxi se obě excentricity kombinují, při tom se může projevit jen jedna v dominantní podobě a druhá je nepatrná. Při uplatnění obou ve stejné zřetelné míře, pak dojde k vychýlení osy rotace rotoru vůči ose statoru a k vychýlení hmoty rotoru.



Obrázek 5: Znárodnění statické, dynamické a smíšené excentricity [4]

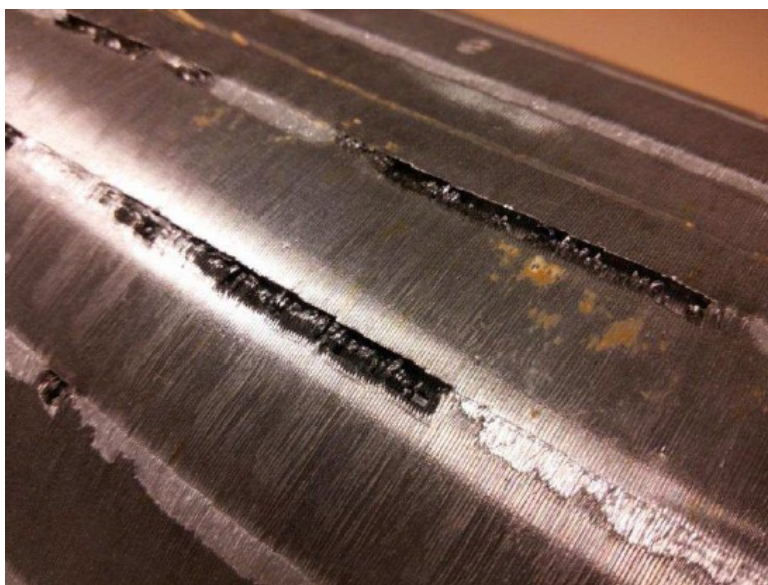
#### Porucha hřídele

V dnešní době je kontrola vstupních materiálů na vysoké úrovni, proto se poruchy tohoto typu v důsledku výrobní vady, nebo špatného materiálu vyskytují velmi zřídka. Hřídel může prasknout v provozu stroje z důvodu nepoužití pružné spojky a přenášení vlivů z poháněného ústrojí na motor. Toto prasknutí se obvykle objevuje v místě spoje.

### Poškození rotorové tyče

Používané rotory u asynchronních motorů můžeme rozdělit z hlediska technologie výroby na rotory hliníkové, který jsou odlité a na rotory s měděnou klecí.

U hliníkových rotorů může nastat k nedokonalému odlití rotorové klece. Horký hliník se vstříkuje do studeného rotorového svazku a může dojít k nedokonalému prolití rotorové drážky vlivem rychlého chladnutí a ztráty tekutosti materiálu. U rotoru měděného se měděné tyče navaří na kruhy rotoru, místo svaru může prasknout.



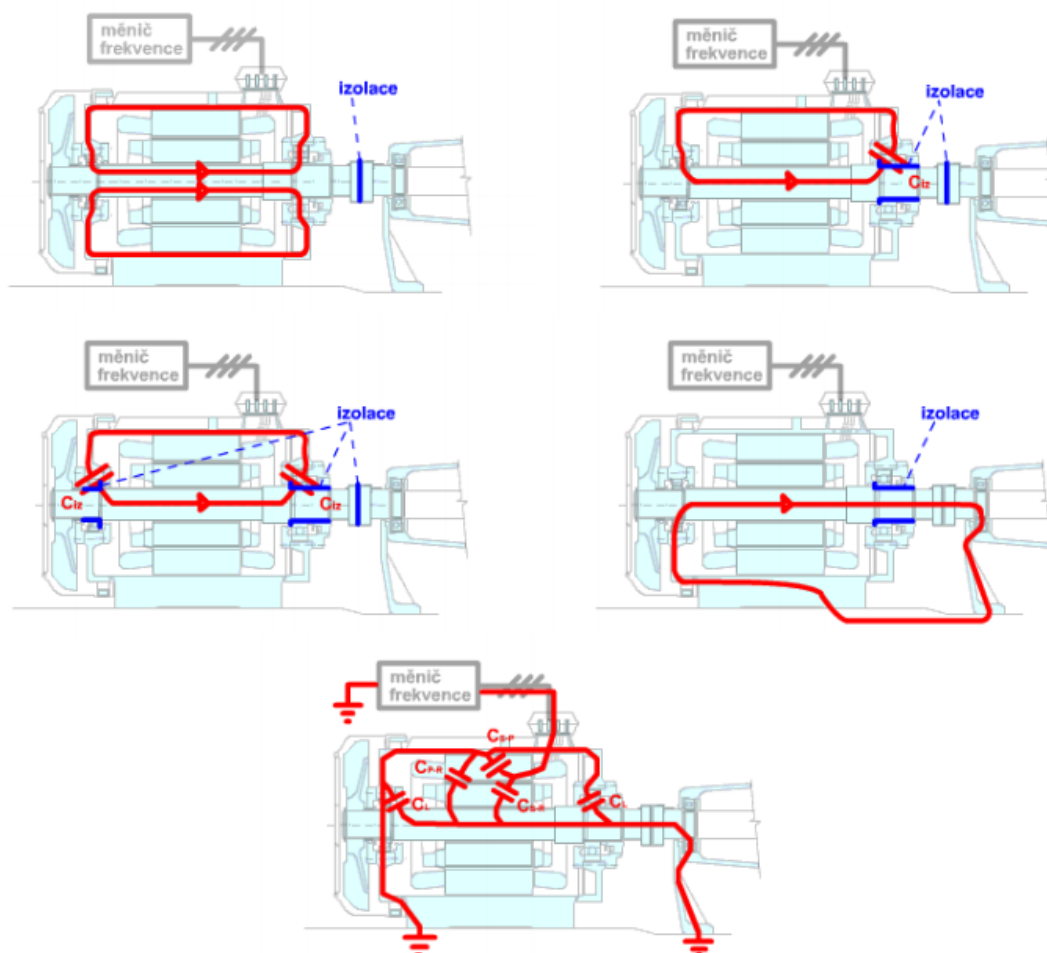
*Obrázek 6: Rotor s nedolitou klecí po obrobení [5]*

### Hřídelové napětí

Hřídelové napětí je spojeno s ložiskovými proudy, které mají za následek snížení životnosti ložisek. Existence hřídelového napětí je dána časovou nebo prostorovou nesymetrií magnetického toku. Tato nesymetrie může být způsobena technologickým postupem výroby nebo nesymetrií vzduchové mezery. Zamezit vznik ložiskových proudů můžeme volbou keramických ložisek, nebo izolováním ložiska od hřídele. Na trhu se také objevuje konstrukční řešení na principu uzemnění hřídele přes zemní kartáč, samozřejmě se najdou aplikace, kde nemůžeme výše uvedené metody použít.

### 1.3. Poruchy ložisek

Mezi nejčastější poruchy mechanického rázu patří poškození ložisek. Důsledek tohoto poškození mohou být ložiskové proudy, které jsem popisoval výše, ale také poškození kvůli enormnímu tření, způsobené špatnou údržbou nebo nadměrné tepelné namáhání dané přechodem tepla z rotoru přes hřídel stroje. V tomto případě má ložiskový vnitřní kroužek vyšší teplotu, blíží se k teplotě rotoru, ale vnější kroužek má teplotu nižší, blíží se k teplotě štítu. Vlivem teplotního spádu má vnitřní a vnější kroužek jinou teplotu a tím se i jinak teplotně deformuje, při teplotní roztažnosti vnitřního kroužku je pak zvýšený tlak na valivé elementy ložiska.

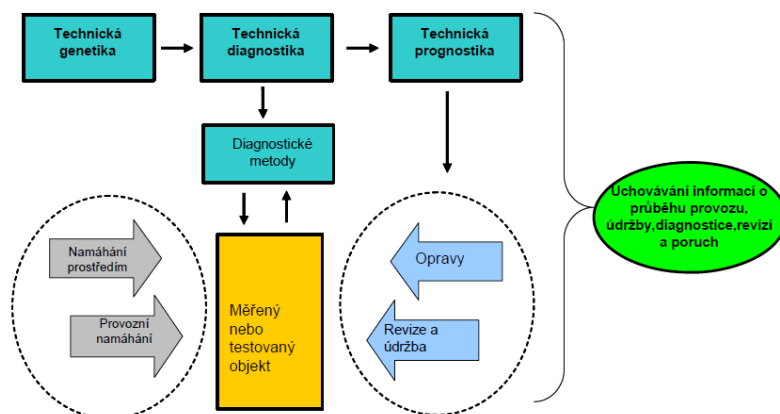


Obrázek 7: Možnosti cesty ložiskových proudů [3]



## 2. Diagnostika a jednotlivé zkoušky

Diagnostiku provádíme za účelem zjištění technického stavu pozorovaného objektu. Správnou volbou diagnostické metody můžeme předcházet rozsáhlým poruchám strojů.



Obrázek 8: Schéma diagnostiky [15]

### Technická prognostika:

Soubor metod zabývajících se prediktivní údržbou podle stavu objektu

### Technická genetika:

Popis historie objektu, analýza stavu zjišťovaná v minulosti

### Technická diagnostika:

Zabývá se technickým stavem zařízení, který popisuje schopnost vykonávat svoji funkci za stanovených podmínek.

Technickou diagnostiku můžeme rozdělit na diagnostiku

- Provozní
- Testovací

Provozní diagnostika, také někdy nazývaná offline diagnostická metoda, je metoda, při níž je potřebné testovaný objekt uvést mimo provoz, veličiny, na kterých je tato metoda založená, jsou generovány diagnostickým zařízením. [15]

Pro testovací diagnostiku není potřeba zařízení generující testovací signál, ale dané zařízení diagnostikujeme na základně provozních veličin zařízení, tyto metody jsou taktéž nazývány metodami online. Testovací diagnostiku lze použít za plného provozu jako monitorování stavu zařízení. [15]

## 2.1. Analýza statorového proudu

Diagnostika proudu statorového vinutí označována také zkratkou MCSA (z anglického: motor current signature analysis). Tato on-line metoda využívá k detekci poruch analýzu statorového proudu. Ten je snímán buď pomocí proudového transformátoru nebo pomocí senzorů. Monitorovat můžeme jen jednu fázi, nebo pro zvýšení přesnosti a kvality diagnostiky, můžeme monitorovat všechny fáze. Mezi výhody této metody jsou především nízké investiční náklady a neinvazivnost procesu. Jako jednu z nevýhod můžeme považovat nemožnost měření motoru, který po dobu testu mění své otáčky. Jakékoliv vnější vlivy, které způsobí nekonstantní provoz se promítnou do spektra. V ideálním případě bychom v rozkladu frekvenčního spektra viděli pouze harmonickou napájecí frekvenci, takový případ samozřejmě neexistuje a z reálného měření uvidíme spektrum, které má dominantní první harmonickou síťové frekvence a ostatní harmonické, které způsobuje nedokonalost magnetického a elektrického obvodu. [1]

### Čidla pro měření proudu:

Pro měření průběhu statorového proudu se využívají čidla společnosti LEM, jejich čidla pracují na principu Hallova jevu nebo fluxgate či air-core technologií. Čidla pracující na principu Hallova jevu můžeme rozdělit dle konstrukce:

- OL – open loop – otevřená smyčka
- CL – close loop – uzavřená smyčka
- ETA – pojmenované po řeckém písmenku vyjadřující účinnost

Tyto čidla mají poměrně jednoduchou konstrukci, jsou vhodné pro měření stejnosměrného i střídavého proudu.

Následují čidla pracující na technologii fluxgate, které mají hlavní přednost ve velmi vysoké přesnosti měření. Technologie air-core využívá technologii Rogowského pásku tzn. zaznamená pouze změnu magnetického pole vyvolanou protékajícím proudem. Proto je možné měřit pouze AC proud.

Tabulka 1: LEM [7]

TYP		Senzory využívající Hallova efektu			Senzory v. Air-core tech.	
		CL	ETA	OL	LEM - flex	PRIME
Měřicí rozsah	$I_p$	0-15 kA	25-150 A	0-15 kA	0 -10 KA	0 -10 kA
Šířka pásma	f	0 - 200 kHz	0 - 100 kHz	0 - 25 kHz	10 Hz - 100 kHz	
Časová odezva	$t_d$	< 1 $\mu$ s	< 1 $\mu$ s	< 3-7 $\mu$ s	10 - 50 $\mu$ s	2 - 50 $\mu$ s
Přesnost (25°C)	X	$\pm 0,5$ %	$\pm 1,5$ % DC $\pm 0,5$ % AC	$\pm 1,5$ %	$\pm 1$ %	$\pm 0,5$ %
Linearita	-	$\pm 0,1$ %	$\pm 1,5$ % DC $\pm 0,5$ % AC	$\pm 0,5$ %	$\pm 0,2$ %	$\pm 0,2$ %
TYP		Senzory využívající fluxgate technologii				
		IT	C	CTS	Standart	
Měřicí rozsah	$I_p$	0-600 A	0 - 150 A	0 - 400 A	0 - 500 A	
Šířka pásma	f	0 - 100 kHz	0 - 500 kHz	0 - 100 Hz	0 - 200 kHz	
Časová odezva	$t_d$	< 1 $\mu$ s	< 0,4 $\mu$ s	< 5 ms	< 1 $\mu$ s	
Přesnost (25°C)	X	$\pm 0,0002$ %	$\pm 0,1$ %	$\pm 0,1$ %	$\pm 0,2$ %	
Linearita	-	$\pm 0,0001$ %	$\pm 0,05$ %	$\pm 0,1$ %	$\pm 0,1$ %	

## FFT

Rychlá Fourierova transformace je jedna z nejčastěji používaných algoritmů pro výpočet diskrétní Fourierovy transformace. Tento algoritmus publikoval v roce 1965 J.W. Cooley a J.W. Tukey. Tento algoritmus se často používá při frekvenční analýze signálu, převodu z časové oblasti do frekvenční, opačný postup se nazývá rychlá inverzní Fourierova transformace, zkráceně IFFT. [8]

Základní myšlenka pro Fourierovou transformaci se zakládá na principu, kdy můžeme každou spojitou funkci zapsat pomocí součtu nekonečné řady:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad (2.1)$$

Definice spojitě Fourierovy transformace:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2.2)$$

## Diskrétní Fourierova transformace

V dnešní době analyzujeme často signály digitální, které na rozdíl od signálu analogových nejsou popsány funkcí, ale číselnou řadou, v takovém případě je nemožné užití klasické Fourierovy řady, která je aplikována na dané funkce času. Tyto signály jsou často náhodné a konečné. Kvůli takových aplikací se vyvinula metodika, která umožňuje zpracovat periodické vzorkované časové signály. Požadavkem pro tuto metodiku je, že pro daný vzorkovaný signál musí být výsledek stejný, jako kdyby byl výchozí signál spojitý. [8]

Uvažujme řadu čísel s  $N$  prvky  $f_0, f_1, \dots, f_{N-1}$  pro něž platí  $f_i = f(t_i)$ , kde  $t_i = i \cdot \Delta t$  pro  $i = 1, 2, \dots, N - 1$ . O této řadě se předpokládá, že se periodicky opakuje, tedy  $f_i = f_{i + N}$ . Její Fourierova transformace je definována:

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2.3)$$

Kde:  $n=0,1,\dots,N-1$

## Rychlá Fourierova transformace

Pro Fourierovu transformaci je potřeba určit velké množství koeficientů, při snaze zredukovat počet koeficientů a snížit náročnost a zdoluhavost výpočtu byla vynalezena metoda, které říkáme rychlá Fourierova transformace. Je to metoda výpočtu, při které získáme snadněji a rychleji stejný výsledek, jako při aplikaci diskrétní Fourierovy transformace. V základní podobě lze aplikovat na signály, které se skládají z  $n^2$  vzorků. Upravené algoritmy pracují i s libovolným počtem vzorků. [8]

Stručný postup:

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} f_k e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (2.4)$$

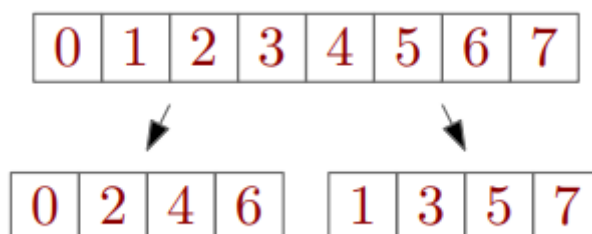
Kde:  $n=0,1,\dots,N-1$

Vzorky se rozdělí na liché a sudé:

$$e_n = f_{2n} \quad (2.5)$$

$$o_n = f_{2n+1} \quad (2.6)$$

Kde:  $n=0,1,\dots,(N/2)-1$



Obrázek 9: Rozdělení vzorků na sudé a liché: [8]

Pak můžeme zapsat transformaci takto:

$$F_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} \left( e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} + o_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k+1)n} \right) \quad (2.7)$$

$$F_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} + e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} o_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} \quad (2.8)$$

$n=0,1,\dots,\frac{N}{2}-1$

Označíme:

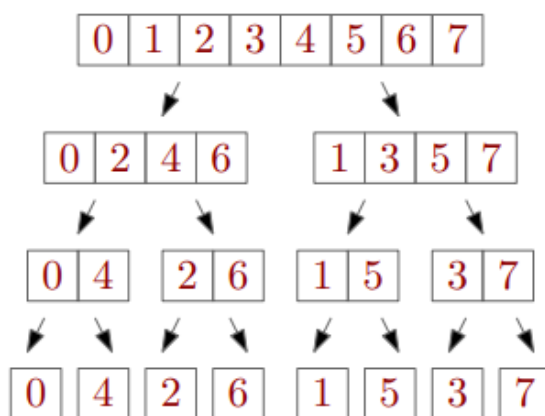
$$E_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} \quad (2.9)$$

$$O_n = \sum_{k=0}^{\frac{N}{2}-1} e_n \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2k)n} \quad (2.10)$$

Stejným postupem bychom získali členy pro  $n \geq \frac{N}{2}$ . Kvůli periodicity platí  $E_{n+\frac{N}{2}} = E_n$  a obdobně také platí  $O_{n+\frac{N}{2}} = O_n$ . Pomocí  $E$  a  $O$  lze výslednou transformaci napsat:

$$F_n = \begin{cases} E_n + e^{-\frac{2\pi i}{N}n} O_n & \text{pro } n < \frac{N}{2} \\ E_{n-\frac{N}{2}} - e^{-\frac{2\pi i}{N}(n-\frac{N}{2})} O_{n-\frac{N}{2}} & \text{pro } n \geq \frac{N}{2} \end{cases} \quad (2.11)$$

Tímto jsme dokázali transformaci  $N$  bodů rozdělit na dvě části obsahující  $N/2$  bodů, tento postup se opakuje, než dostaneme jen dva prvky. Úspora počtu operací je z  $O(N^2)$  na  $O(N \log N)$



Obrázek 10: konečné rozdělení [8]

### 2.1.1. Metodiky pro zpracování signálu

Mezi současné metodiky, pro zpracování signálů patří:

- STFT - short-time Fourier transform
- WT - wavelet transform
- DWT - discrete wavelet transform
- CWT - continuous wavelet transform
- WPD - wavelet packet decomposition
- WVD - Wigner Ville distribution
- PSD - power spectral density
- Park transform
- SVM
- Prony analysis
- Fractal
- Fuzzy logic

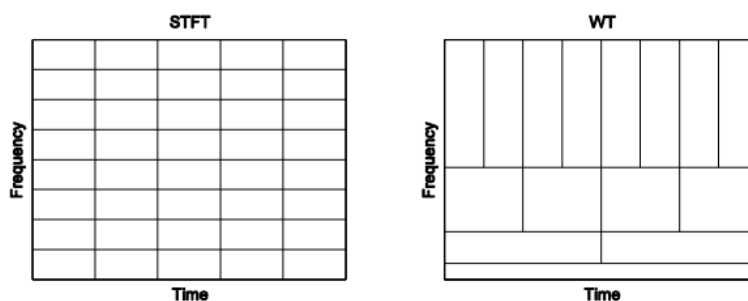
#### STFT - short-time Fourier transform – krátkodobá Fourierova transformace

Při použití rychlé Fourierovy transformace vzniká nevýhoda, s kterou musíme počítat. FFT zaznamená harmonické složky způsobené poruchou motoru společně s harmonickými složkami způsobenými kolísáním napětí, zátěže nebo rychlosti. Tento problém byl vyřešen pomocí metody STFT, kdy tato metoda používá okno s konstantní velikostí analyzovaných frekvencí.

Modifikovaný signál můžeme popsat jako funkci dvou časů. Stacionárního a průběžného. Okénková funkce je nastavena tak, aby signál zůstal v podobě okolí zvoleného času a zbylý signál se potlačil. [1][9]

#### WT - wavelet transform – vlnková transformace

Vlnková transformace je pokročilý analogický nástroj, který řeší nedokonalosti STFT metody. Je vhodný pro analýzu přechodových jevů. Na rozdíl od STFT nepoužívá k rozkladu signálu na harmonické signály, ale množinu ortonormálních funkcí (bází). Tyto funkce jsou vytvářeny roztahováním a posunem matičního waveltu.



Obrázek 11: STFT A WT okno [9]

## 2.1.2. Jednotlivé vady a jejich diagnostika pomocí MCA

### Metodika odhadu skluzu

Tuto metodiku potřebujeme použít, pokud neznáme skluz motoru, zejména při diagnostice v průmyslu. Pro vyhodnocení ve zkušebně, kdy na motoru je namontován otáčkoměr známe přesnou hodnotu skluzu. [1]

### Excentricity rotoru

#### Statická excentricita

Při statické excentricitě určuje poloha rotoru velikost vzduchové mezery. Při použití této úvahy dokážeme stanovit rychlost rotace pole ve vzduchové mezeře. Pole se otáčí úhlovou rychlostí, která dána napájecím kmitočtem a počtem pól párů. Interakce statorového a rotorového pole je nejsilnější v místě, kde je vzduchová mezera nejmenší. [1][4]

$$f_{st} = 2 \cdot f_1 \mp \frac{f_1}{2} \quad (2.12)$$

$$f_{st} = 2 \cdot f_1 \quad (2.13)$$

Kde:  $f_1$       napájecí frekvence [Hz]

#### Dynamická excentricita:

Dynamická excentricita se projevívá vznikem postranních pásem, poloha místa s nejužší vzduchovou mezerou, kde dochází k interakci obou polí je funkcí času. Dynamická excentricita se projevívá vznikem postranních pásem, které se posunují od napájecího kmitočtu frekvencí rotoru. [1][4]

$$f_{dyn} = f_1 \mp (1 - s) \frac{f_1}{2} \quad (2.14)$$

Kde:  $f_1$       napájecí frekvence [Hz]

$s$       skluz [-]

## Excentricita smíšená

Je kombinací statické a dynamické excentricity, frekvenční složky způsobující smíšená excentricita můžeme vyjádřit následovně: [4]

$$f_{mix} = f_1 \left[ (k \cdot Q_R \mp k_d) \left( \frac{1-s}{p} \right) \mp n \right] \quad (2.15)$$

Kde  $n$  pořadí harmonické

$k$  celočíselný součinitel

$Q_R$  počet rotorových tyčí

$K_d$  typ excentricity (0 – statická; 1,2,3 – dynamická)

$P$  počet pólpárů

Výše uvedené vztahy jsou teoretické a v praxi se setkáme i s použitím těchto výpočtů:

Pro výpočet pásem nižších kmitočtů:

$$f_{nižší} = f_1 \left[ 1 \mp n \frac{(1-s)}{p} \right] \quad (2.16)$$

Pro vyšší kmitočty:

$$f_{vyš} = f_1 \left[ \frac{Q}{p} (1-s) \mp n \right] \quad (2.17)$$

Dále vztah pro výpočet postranních pásem posunutých o rotorovou frekvenci:

$$f_{vyš+} = f_1 \left\{ \left[ \frac{Q}{p} (1-s) \mp n \right] \mp \left[ \frac{(1-s)}{p} \right] \right\} \quad (2.18)$$

Kde  $Q$  počet rotorových drážek

$P$  počet pólpárů

$n$  pořadí harmonické

$s$  skluz

$f_1$  napájecí frekvence



### Prasklá rotorová tyč:

Prasklou rotorovou tyč můžeme detekovat pomocí analýzy statorového proudu, vytváří frekvence postranního pásma. Rotorová nesymetrie vytvoří zpětné rotující pole o skluzové frekvenci. [1][4]

$$f_{rotor} = f_1(1 \pm 2 \cdot n \cdot s) \quad (2.19)$$

Kde  $f_1$  frekvence napájecího napětí  
 $n$  pořadí harmonické  
 $s$  skluz

### Poruchy statorového vinutí:

Tyto poruchy mají za důsledek většinou závitové zkratky, které vytváří negativní magnetické toky, které působí proti toku fáze. Působení těchto negativních toků způsobuje snížení celkového toku fáze a tím snížení magnetomotorické síly. [4]

$$f_{stator} = f_1 \cdot \left[ \frac{k}{p} 1 \pm 2 \cdot n \cdot s \right] \quad (2.20)$$

Kde:  $f_1$  frekvence napájecího napětí  
 $n$  pořadí harmonické a nabývá hodnot 1, 3, 5  
 $s$  je skluz v poměrných  
 $p$  počet pól-párů  
 $k$  je celočíselný součinitel.

### Vadné ustavení motoru

Nesprávné ustanovení motoru vůči poháněnému zařízení způsobuje zpravidla nesouosost, která vyvolá deformační a třecí síly. Tyto síly mohou vést až k destrukci ložisek. Ve spektru se projeví posunutím postranních pásem do nosné frekvence. [1]

Pro postranní pásma platí:

$$f_{us} = f_1 \mp \left( \frac{n}{60} + s \cdot f_1 + v \frac{n}{60} \right) \quad (2.21)$$

Kde:  $f_1$  frekvence napájecího napětí  
 $n$  pořadí harmonické a nabývá hodnot 1, 3, 5  
 $s$  je skluz v poměrných

## Poruchy ložisek

Vadná ložiska způsobí nekonstantní délku vzduchové mezery při otáčení motoru. Vzniklé frekvence, které se projeví ve frekvenčním spektru můžeme zapsat následující rovnicí [4]

$$f_{\text{ložiska}} = f_1 \mp p_l \cdot f_p \quad (2.22)$$

Kde:  $p_l$  počet valivých elementů

$f_p$  frekvence poruchy

Frekvenci daného typu poruchy pak můžeme následovně vypočítat:

Frekvence pro poruchu na vnitřním ložiskovém kroužku:

$$f_{\text{vnitřní}} = \frac{p_l}{2} (1 - s) \cdot f_1 \cdot \left[ 1 + \frac{d_k}{d_r} \cdot \cos(\beta) \right] \quad (2.23)$$

Frekvence pro poruchu na vnějším ložiskovém kroužku:

$$f_{\text{vnější}} = \frac{p_l}{2} (1 - s) \cdot f_1 \cdot \left[ 1 - \frac{d_k}{d_r} \cdot \cos(\beta) \right] \quad (2.24)$$

Frekvence pro poruchu vzniklou vadou valivého elementu

$$f_{\text{vnitřní}} = \frac{p_l}{2} (1 - s) \cdot f_1 \cdot \left\{ 1 - \left[ \frac{d_k}{d_r} \cdot \cos(\beta) \right]^2 \right\} \quad (2.25)$$

Frekvence pro poruchu vzniklou vadou klece

$$f_{\text{vnitřní}} = \frac{p_l}{2} (1 - s) \cdot f_1 \cdot \left\{ 1 + \left[ \frac{d_k}{d_r} \cdot \cos(\beta) \right]^2 \right\} \quad (2.26)$$

Kde:  $p_l$  počet valivých elementů

$s$  skluz v poměrných hodnotách

$f_1$  napájecí frekvence

$d_k$  průměr elementu

$d_r$  roztečný průměr

$\beta$  úhel naklonění osy rotace elementu

## 2.2.Vibrodiagnostika

Analýza vibrací, také označována zkratkou MVA – motor vibration analysis.

Vibrace je mechanické kmitání prostředí, vznikají pohybem pružného tělesa. Jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Oscilační pohyb, který vykonává těleso, může být čistě harmonický, nebo složený s více harmonických. V praxi se s čistě harmonickým průběhem nesetkáme. U analýzy vibrací můžeme setkat s náhodnými vibracemi, které jsou neperiodické. Při analýze těchto náhodných neperiodických vibrací zjistíme, že jeho frekvenční spektrum obsahuje všechny frekvenci od nuly do maximální frekvence, tato forma vibrací se u měření asynchronních motorů nevyskytuje.

Vibrace jsou sledovaným parametrem, a každý motor na zkušebně musí vyhovět stanoveným limitům dle normy IEC 60034-14. Při jejich sledování můžeme zjistit i predikovat technické poruchy. Měření vibrací asynchronního motoru je měření periodického pohybu. Pro popis vibrací používáme tyto fyzikální jednotky:

- Výchylka
- Rychlost
- Zrychlení

### Hodnoty z normy:

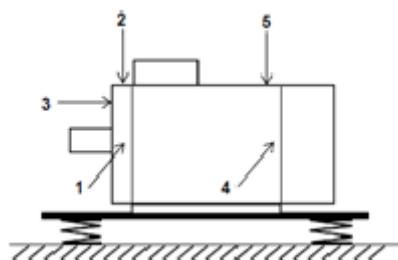
Tabulka 2: IEC 60034-14

Třída vibrací	Osová výška [mm]	56 ≤ H ≤ 132		
	Uchycení	Výchylka [μm]	Rychlost [mm/s]	Zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]
A	Pružné	25	1,6	2,5
	Pevné	21	1,3	2
B	Pružné	11	0,7	1,1
Osová výška [mm]		56 ≤ H ≤ 132		
A	Pružné	35	2,2	3,5
	Pevné	29	1,8	2,8
B	Pružné	18	1,1	1,7
	Pevné	14	0,9	1,4
Osová výška [mm]		H > 280		
A	Pružné	45	2,8	4,4
	Pevné	37	2,3	3,6
B	Pružné	29	1,8	2,8
	Pevné	24	1,5	2,4

### Typy uložení motoru:

#### Free suspension – volné uložení

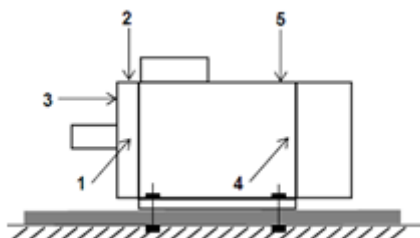
Měření tohoto typu, je realizované zavěšením motoru, nebo připevnění k podložce, která je s pevnou zemí oddělena tlumením v podobě pružin, nebo gumy.



Obrázek: 12 Volné uložení motoru

#### Rigid mount – pevné uložení:

Motor je pevně ukotven na podložku, přes patky na kostře motoru.



Obrázek 13: Pevné uložení motoru

### Výchylka vibrací:

Měří se v jednotkách délky, definujeme ji jako vzdálenost objektu od rovnovážné polohy, kterou můžeme popsat rovnicí:

$$x = x_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (2.27)$$

Kde  $\omega$  úhlová frekvence

### Rychlost vibrací:

Rychlost vibrací je nejčastěji používaná jednotka popisu vibrací, popisuje rychlost, jakou se pohybuje oscilující objekt. Udává se v jednotkách délky za sekundu. Matematicky ji můžeme vyjádřit touto rovnicí:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.28)$$

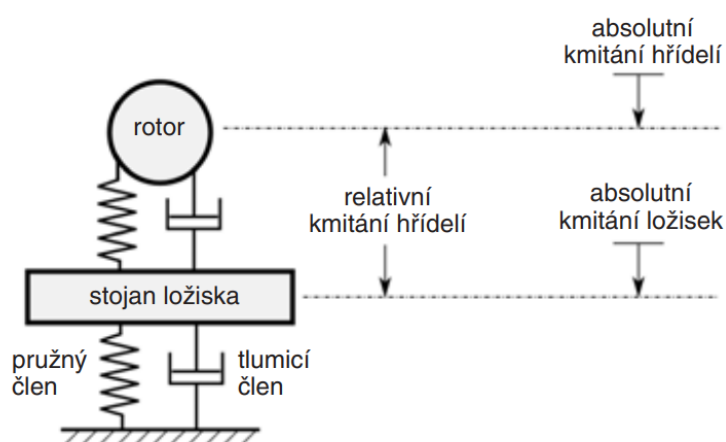
## Zrychlení vibrací:

Veličina měřená akcelerometrem, která se vyjadřuje v absolutní jednotkách, nebo v násobcích tíhového zrychlení. Matematicky ji můžeme zapsat:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.28)$$

### 2.2.1. Snímače signálu

Snímače volíme veličiny, kterou chceme měřit. Dále je potřeba si určit, zda chceme měřit vibrace relativní, nebo absolutní:



Obrázek 14: Snímač [10]

- Snímače výchylky
- Snímače rychlosti
- Akcelerometry

### Snímače výchylky:

Tyto snímače můžeme rozdělit podle principu funkce na:

- Indukční
- Indukčnostní
- Kapacitní
- Magnetické
- Optické

Ve vibrodiagnostice nejčastěji využíváme snímače pracující na principu indukčnostní. Tyto snímače využívají závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Indukčnostní snímače jsou citlivé na parazitní jevy, jako jsou délka kabelu či působení okolního elektromagnetického pole, pro omezení vlivu parazitních jevů se využívá integrovaná konstrukce snímače, kdy ve stínícím obalu jsou zapouzdřeny komponenty elektroniky spolu s cívkou. [10]

### Snímače rychlosti:

Snímat rychlost můžeme přes akcelerometr, kdy integrujeme výstupní signál, nebo použijeme elektrodynamický snímač.

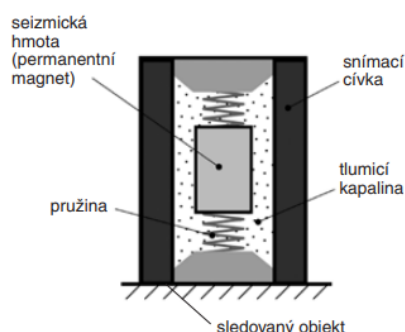
Princip tohoto snímače je vyobrazen na obr.15, kde seizmickou hodnotu tvoří cívka pohybující se v magnetickém poli permanentního magnetu. Při kmitavém pohybu se v cívce indukují elektromotorická síla  $U$ . Tuto sílu můžeme vyjádřit vztahem:

$$U = Blv \quad (2.28)$$

Kde:  $B$  magnetické pole ve vzduchové mezeře snímače

$l$  délka vodiče cívky

$v$  rychlost kmitní pouzdra snímače



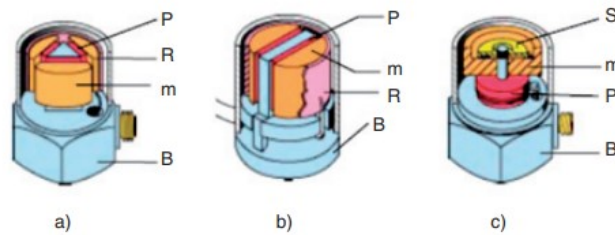
Obrázek 15: Snímač rychlosti kmitavého pohybu [10]

Tyto snímače mají vlastní rezonanční kmitočet položen mezi hodnotami 5 a 10 Hz, pro použití pro měření nízkých frekvencí je třeba vhodně nastavit tlumení, nebo korekci převodní charakteristiky. Horní hranice měřicího rozsahu je 3,5 kHz.

## Akcelerometry

Nejčastěji používaný akcelerometr pracuje na principu piezoelektrického jevu. Konstrukční řešení je založeno buď na tlakovém, nebo na smykovém namáhání piezokrystalu. Druhé zmíněné provedení je častější, konkrétně provedení typu Delta Shear, toto provedení v sobě skrývá tři dvojice piezokrystalů společně se setrvačnými hmotami umístěnými na trojbokém sloupku. Toto konstrukční řešení se vyznačuje velkou linearitou a citlivostí. Další konstrukční typ Planar Shear je podobný výše uvedenému, jen se sníženým počtem dvojic krystalů.

Nejjednodušší technické provedení má snímač s centrálním tlakovým namáháním. Jeho nevýhodou je nižší citlivost než výše uvedené typy pracující na smykovém namáhání krystalu.



Obrázek 16: Piezoelektrický akcelerometr [10]

- a) delta shear
- b) planar shear
- c) s centrálním tlakovým namáháním
- P – piezoelektrický prvek
- R - přepínací prstenec
- S - Přepínací disk

Analýzu signálu můžeme provést v oblastech:

- Časových
- Frekvenčních
- Modálních

Vznik vibrací v elektromotoru můžeme rozdělit na:

- Mechanický
- Elektromagnetický

Mechanický původ vibrací:

Při zkoumání původu vibrací je stroj autogenerační systém, který při provozu generuje odezvu na napájecí systém. Energie přivedená do motoru se následně mění na chtěný rotační pohyb a doprovodné dynamické procesy:

- Vibrace
- Hluk
- Pulzace média
- Akustické emise

### 2.2.2. Příčiny vzniku vibrací a jejich diagnostika:

- Nevýváženost
  - Statickou
  - Momentovou
  - Kvazistatickou
  - Dynamickou
- Ohnutou hřídel
- Nesouosost
- Spojky
- Vůle v uložení
- Valivá ložiska

Nevýváženost se projeví při pohybu, je to jev dynamický. Podle typu nevyváhy volíme způsob vyvážení. Vyvažování v rovině se používá pro kompenzaci nevyváhy statické a kvazistatické, naopak pro nevyváhu momentovou a dynamickou musí být provedeno vyvažování ve dvou rovinách. Rozdělení nevyváženosti je důležité pro stroje kde se blíží jmenovité otáčky k modální-kritické frekvenci. Při stavu, kdy se rotor bude provozovat na kritické frekvenci může dojít k destrukci kvůli rezonanci.

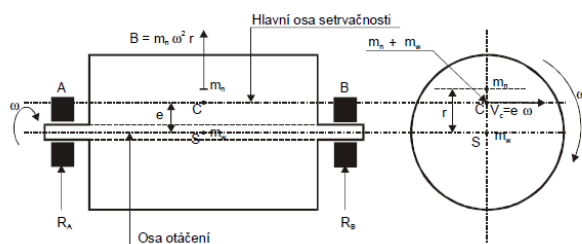
$$\omega_{kr} = 2\pi f_{kr} = \sqrt{\frac{k_z}{m_u}} \quad (2.29)$$

Kde  $K_z$  náhradní tuhost soustavy

$M_z$  náhradní hmota soustavy

#### Nevýváženost statická

Je dána nevyváhou rotoru, existencí tzv “těžkého bodu”. Při odpojení přívodní energie a následnému setrvačnému doběhu motoru, se rotor dostane do klidové polohy. Tyto poloha je při vyváženém rotoru pokaždé jiná, při rotoru, který má tzv “těžkého bod”, tento bod bude vždy v dolní polovině rotoru po doběhu.



Obrázek 17: Statická nevyváženost [11]



Nevyváženou hmotu můžeme popsat:

$$B = m_n r \omega^2 \quad (2.30)$$

Posunutí osy setrvačnosti

$$B = (m_n + m_w) e \omega^2 \quad (2.31)$$

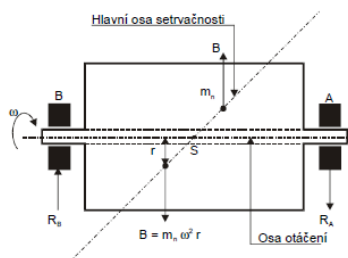
$$e = \frac{m_n r}{m_n + m_w} \cong \frac{m_n r}{m_w} \quad (m_w \gg m_n) \quad (2.32)$$

Tuhost ložisek je omezená, a proto změny hodnoty  $R_a$  a  $R_b$  zapříčiní vznik vibrací s frekvencí danou vztahem:

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{n}{60} \quad (2.33)$$

### Momentová nevyváženost

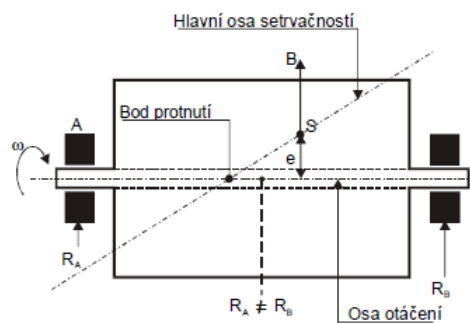
Pro momentovou nevyváženost platí, že nevyvážené hmoty jsou symetricky rozloženy vůči těžišti. Tento fakt zapříčiní že reakce ložisek  $R_a$  a  $R_b$  jsou vzájemně pootočené o  $180^\circ$  a mají stejnou amplitudu. Tuto nevyváženost můžeme detekovat měřením vibrací na ložiskových stojanech.



Obrázek 18: Momentová nevyváženost [11]

### Kvazistatická nevyváženost

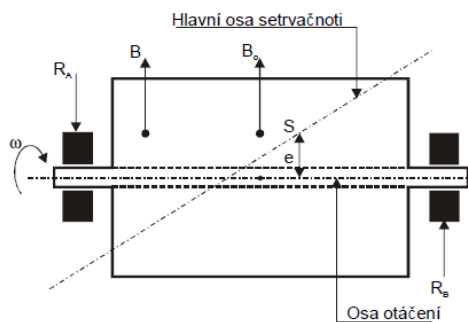
Vznik je zapříčiněn existencí nevyvážené hmoty rozložené mimo těžiště. Vzniká vlastní nevyváženost, hlavní osa setrvačnosti protíná osu rotace mimo těžiště. Reakce  $R_a$  a  $R_b$  jsou do velikosti různé, ale ve fázi.



Obrázek 19: Kvazistatická nevyváženost [11]

### Dynamická nevyváženost

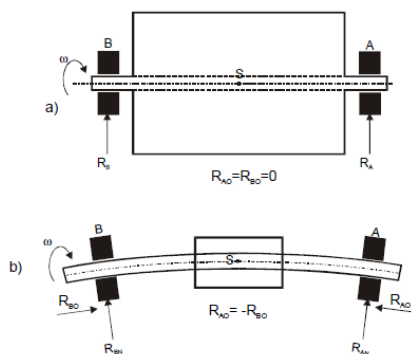
Nejčastěji vyskytující se nevyváženost hmot rotoru, hlavní osa setrvačnosti je nestabilní vůči ose rotace (vzdálenost  $e$ ). Reakce ložisek budou proměnlivé a fázově posunuty o  $180^\circ$



Obrázek 20: Dynamická nevyváženost [11]

### Ohnutá hřídel

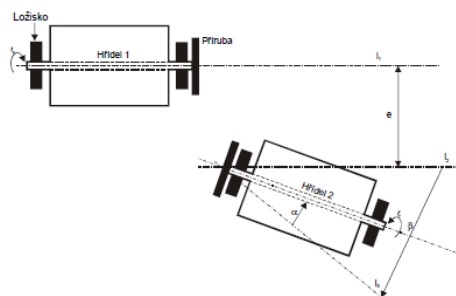
Z hlediska nevyváhy můžeme na ohnutou hřídel nahlížet stejně jako na kvazistatickou nebo statickou nevyváhu. Ohnutá hřídel působí na ložiska radiální silou, při změřených vibracích zjistíme že fázový posun reakcí je  $180^\circ$



Obrázek 21: Ohnutá hřídel [11]

## Nesouosost hřídelí

Spojení hnaní a hnací hřídele nebude nikdy dokonalé, a proto se vždy projeví nesouosost těchto hřídelí vlivem výrobních vad a montážních chyb. Nesouosost můžeme rozdělit na paralelní a úhlovou.



Obrázek 22: Nesouosost hřídelí [11]

Nesouosost se projeví vibracemi s dvojnásobnou otáčkovou frekvencí:

$$f_{nes} = 2 \cdot f = 2 \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\omega}{\pi} \quad (2.34)$$

## Spojky

Spojky mají velký vliv na celé soustrojí, můžeme je rozdělit na:

- Pevné – skládají se ze 2 přírub, které jsou sešroubovány k sobě
- Pružné – je složena s pryžových nebo pružinových součástí, které jsou schopny absorbovat vibrace
- Zubové

Spojky pružné a zubové jsou schopny kompenzovat výrobní a montážní vady.

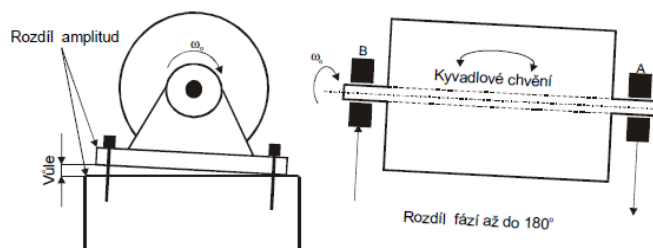
Nevyváha spojky se projeví vibracemi s otáčkovou frekvencí  $f_1$ , při zubové spojce platí tento vztah:

$$f_{zub} = z \cdot f_1 = z \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.35)$$

Kde  $z$  počet zubů spojky

## Vůle v uložení

Při nedotažení kotvících šroubu vzniká vůle v uložení, která zapříčiní vznik přídavných vibrací. V krajním případě dojde k utržení těchto šroubů. Vznikají jako výše uvedené typy v otáčkové nebo 2násobku otáčkové frekvence.



Obrázek 23: Vůle v uložení [11]

## Valivá ložiska

Vznik vibrací v ložisku je dán pohybem ložiskových elementů. Tyto elementy dosedají bodově nebo přímkově na sebe, přenášením zatížení a změna tuhosti ložiska vede k vibracím. Jako další interpretace vzniku vibrací v ložiskách můžou být brány výrobní vady a velikost výrobních tolerancí.

## Elektromagnetický zdroj vibrací

Vibrace také vznikají působením elektromagnetických polí a deformací magnetického obvodu stroje. Na nedokonalost magnetického obvodu má nerovnoměrné vinutí ve drážkách a nesymetrie vzduchové mezery.

## 2.3. Akustická diagnostika

Hluk je nežádoucí zvuk, který vstupuje do návrhu asynchronního motoru, jeho limitní hodnoty jsou sledovány normou IEC 60034-9.

Definované a měřené veličiny jsou:

- Akustický tlak
- Akustický výkon

### Akustický tlak

Při šíření zvukové vlny kmitají molekuly prostředí, ve kterém se vlna šíří, v důsledku kmitání vyvolají molekuly v jejich místě tlakovou změnu, kterou nazýváme akustickým tlakem, ten se vyjadřuje v decibelech (dBA) a je to zvuková energie vyzářena ze stroje. Velikost dosaženého akustického tlaku závisí na prostředí a na akustické rychlosti. Výsledná velikost tlaku je pak dána součtem akustického a klidového tlaku. Maximální hodnotu můžeme vyjádřit takto:

$$p_{max} = \rho \cdot c \cdot v_{max} \quad (2.36)$$

Kde:  $\rho$  je hustota prostředí

Definice podle IEC 60034-9:

$$p = 10 \log \frac{W_x}{W_0} \quad (2.37)$$

Kde  $W_x$  Měřené veličina

$W_0$  Referenční hodnota  $10^{-12}$  W

### Akustický výkon

Zatímco akustický tlak charakterizuje účinek zvuku, tak akustický výkon charakterizuje zvukový zdroj. Definujeme jako množství přenesené akustické energie, za jednotku času. Akustický výkon je definován rovnicí:

$$P = \frac{dE}{dt} \quad (2.38)$$

Kde  $E$  akustická energie

Definice podle IEC 60034-9:

$$P = 10 \log \frac{P_x^2}{P_0^2} \quad (2.39)$$

Kde  $P_x$  Měřená veličina

$P_0$  Referenční hodnota  $10^{-8}$  Pa

#### Určení limitů úrovně akustického výkonu podle IEC 60034-9

Rozlišuje se hodnota zatíženého a nezatíženého motoru:

Tabulka 3: IEC 60034-9

Osová výška [mm]	Maximální hladina akustického výkonu pro provoz bez zatížení			
	2	4	6	8
90	78	66	63	63
100	82	70	64	64
112	83	72	70	70
132	85	75	73	71
160	87	77	73	72
180	88	80	77	76
200	90	83	80	79
225	92	84	80	79
250	92	85	82	80
280	94	88	85	82
315	98	94	89	88
355	100	95	94	92
400	100	99	95	94
450	100	98	98	96
500	103	99	98	97
560	105	100	99	98
Povolené zvýšení akustického výkonu pro provoz při zatížení				
$90 \leq H \leq 160$	2	5	7	8
$180 \leq H \leq 200$	2	4	6	7
$225 \leq H \leq 280$	2	3	6	7
$H = 315$	2	3	5	6
$355 \leq H$	2	2	4	5

## Rozdělení zdrojů hluku

Tak jako vibrace můžeme rozdělit i zdroje hluku na:

- Mechanické
- Elektrodynamické
- Aerodynamické

## Hluk mechanického původu

Mezi hluk mechanický řadíme především hluk způsobený ložiskovým uzlem stroje nebo nevývážou rotoru. U valivých ložisek může dojít k lokálním destrukcím valivé dráhy, nebo valivého elementu, které způsobí buzení periodických impulzů, v horším případě se tyto impulzy amplitudově namodulují. Při frekvenční analýze se objeví diskrétní spektrum, kdy se kolem základních kmitočtů objeví postranní pásma.

Hluk od ložisek mohou ovlivnit tyto faktory:

- Správným výběrem typu ložiska a bezchybná montáž
- Hladkost povrchu ložiskových kroužků, volba lepší třídy přesnosti
- Volba ložiska menších rozměrů
- Volba minimální radiální vůle ložiskového štítu, snížení vlivu teploty

Hluk elektromagnetického původu:

Opodstatnění vzniku hluku elektromagnetického hluku je totožné se vznikem vibrací elektromagnetického původu popsané v předešlé kapitole. Zjištění existence elektromagnetického hluku můžeme provést měřením a sledováním poklesu akustického signálu před a po vypnutí stroje od zdroje elektrické energie. Pokud pokles akustického signálu nastane okamžitě, můžeme za původ tohoto signálu považovat elektromagnetický hluk. Tento hluk dominuje u 6 a 8mi pólových motorů, v případě 2 a 4 pólů je hluk vysokootáčkového ventilátoru dominantnější.

Elektromagnetický hluk můžeme eliminovat některými konstrukčními zásahy:

- Zvolit co nejvyšší poměr mezi počtem drážek rotoru a statoru, tím ovlivníme řád magnetické vlny stroje
- Zajistit rozdílné frekvence silových magnetických vln všech řádů od vlastních frekvencí statorového svazku a kostry
- Volit doporučený poměr statorových a rotorových drážek
- Volit maximální vzduchovou mezeru
- Volba magnetických klínů pozitivně působí na hladinu hluku
- Zajistit rovnoměrnou vzduchovou mezeru a symetrii magnetického obvodu
- Použít maximální počet drážek na pól a fázi
- Používat dvouvrstvé vinutí a zešíkmení drážky
- Zesílit kostru motoru

## Hluk ventilační

Hlavním zdrojem tohoto hluku bývá ventilátor, u asynchronních motorů můžeme tento hluk ovlivnit konstrukcí ventilátoru, ta může být buď radiální, nebo axiální

Tento typ hluku se nejvíce projevuje u motorů 2 pólových a 4 pólových, neboť jejich jmenovité otáčky jsou vyšší a tím roste i hluk od ventilátoru. Spektrum ventilačního hluku může být širokopásmové nebo diskrétní. Širokopásmové spektrum vzniká na hraně lopatek, diskrétní vlivem nedokonalosti cesty proudícího vzduchu, překážky před nebo za ventilátorem, například ventilátorový kryt vytváří nerovnoměrnost rychlostního profilu a následně periodické tlakové pulzace, tomuto jevu se také říká jev sirénový.

Ventilační hluk můžeme snížit:

- Přesným nadimenzováním chladicího systému, volba co nejmenšího ventilátoru
- Zvolit optimální počet lopatek
- Předcházet rezonančním jevům ventilátorovému krytu
- Správná volba rozteče mezi stojícími a rotujícími prvky – snížení sirénového jevu [12]

Určení správné vzdálenosti mezi rotujícími a statickými elementy:

$$a = \frac{n_m^2}{30} \quad (2.40)$$

Kde  $n_m$  obvodová rychlost ventilátoru [ot/min]

Frekvence, kterou generují lopatky ventilátoru:

$$f_v = k N_k n_m \quad (2.41)$$

Kde  $N_k$  počet kanálu



### Vliv stupňovitých harmonických na radiální síly

Při popisu vzniku radiálních sil předpokládáme ideálně symetrickou vzduchovou mezeru a konstantní magnetickou vodivost.  $\Lambda(\alpha, t) = \Delta_0$

$$p_r = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0} \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} F_v F_{\mu} \cos[(v - \mu)\alpha \mp (\omega_v \mp \omega_{\mu}) - \varphi_{\mu}] \quad (2.42)$$

Kde  $v$  a  $\mu$  řady libovolných harmonických magnetomotorických napětí statoru a rotoru

$\varphi_k$  fázový posun mezi fázory vyšších harmonických statoru a rotoru stejného řadu

$\omega$  úhlová frekvence

$\mu_0$  permeabilita vakua

$\Lambda_0$  vodivost vakua

$A$  obvodový úhel

$F_v$  magnetomotorické napětí harmonické statoru

$F_{\mu}$  magnetomotorické napětí harmonické rotoru

Pro vznik radiální síly je zapotřebí vznik síly nízkého řádu, který lze vyjádřit předpokladem:

$$v - \mu = r \quad (2.43)$$

Kde  $r = 0, 1, 2, \dots$

Mezi rotorem a statorem vznikají radiální časově proměnné síly, jejich obecný tvar je

$$p_r = A_r \cos(r\alpha - \Omega t) \quad (2.44)$$

Kde  $r = 0, 1, 2$  (libovolná numera)

$A_r$  amplituda působící síly

$\Omega_r$  úhlový kmitočet síly řadu  $r$

Tyto síly působí po obvodu stroje úhlovou rychlostí rovnou  $\Omega_r / r$ . V jakémkoliv bodě obvodu můžeme vyjádřit tah síly  $\Omega_r / 2\pi$ . K rozechvění sil dochází. Pokud-li počet pólových dvojic vln je malý. Pokud-li je počet pólových dvojic vln vyšší působí síly na kratším ramenu a dochází k velmi malým rezonančním vibracím. Pokud-li  $f_r$  se blíží vlastnímu kmitočtu statoru dochází k největší deformaci statorového prstence. [11]

**Složka síly má tvar při  $r=0$ :**

$$P_0 = A_0 \cos \Omega_0 \quad (2.45)$$

Tato periodicky měnící síla je v čase rovnoměrně rozložená, čím způsobuje ve všech směrech konfázní kmity statorového prstence. Tato složka vznikne za předpokladu složení dvou harmonických složek magnetomotorických napětí se stejným počtem pólových dvojic ale s různými úhlovými kmitočty. [11]

**Při  $r=1$  má složka síly tvar:**

$$P_1 = A_1 \cos(\alpha - \Omega_1 t) \quad (2.46)$$

Tato síla obíhá rychlostí  $\Omega_1$  a pokud-li nastane rezonance s vlastním kmitočtem vznikají silné vibrace.

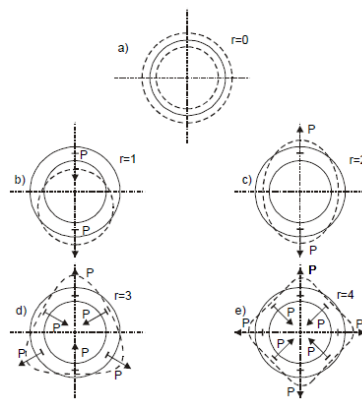
**Při  $r=2,4,6$  má složka síly tvar:**

V těchto případech dochází ke vzniku síly, která způsobí průhyby statorového prstence. Složky můžeme vyjádřit:

$$p_r' = P_\xi \cos(\zeta \alpha - \omega_\zeta + \varphi_\zeta) \quad (2.47)$$

$$p_r'' = P_{\zeta\xi} \cos[(\zeta - \xi)\alpha - (\omega_\zeta - \omega_\xi)t + (\varphi_\zeta - \varphi_\xi)] \quad (2.48)$$

Síly nízkých řádu vzniknou, pokud-li bude pro rovnici 2.47 splněna podmínka:  $|\zeta| = r$  a pro rovnici 2.48 podmínka  $|\zeta - \xi| = r$



Obrázek 24: Deformace statoru [11]

Nejvýznamnější harmonické magnetomotorických napětí jsou stupňovité harmonické řádu:  $\nu = Q_1 \mp p$  a  $Q_2 \mp p$

Kritéria pro snížení hluku jsou:

$$|Q_1 - Q_2| = 0, 1, 2, \dots \quad (2.49)$$

$$|Q_1 - Q_2| = 2p, 2p \mp 1, 2p \mp 2, \dots \quad (2.50)$$

Kde  $Q_1$  počet statorových drážek

$Q_2$  počet rotorových drážek

V určeném bodu a harmonickou kruhovou frekvencí

$$\omega_\nu = \omega = 2\pi f \quad (2.51)$$

Kde  $f$  kmitočet napájecí sítě

Kruhová frekvence rotorového stupňovitého harmonického pole

$$\omega_\nu = \omega \mp kQ_2\omega_R = 2\pi f \left[ 1 \mp k \frac{Q_2}{p} (1 - s) \right] \quad (2.52)$$

Kde  $p$  počet pólových dvojic stroje

$s$  skluz

$k = 1, 2, 6$

$\omega_R$  úhlová rychlost rotoru

Kruhová frekvence

$$\omega_{\xi} = (\omega_{\nu} \mp \omega_{\mu}) \quad (2.53)$$

Kmitání v místě a s kmitočtem

$$f_c = \frac{\omega_{\xi}}{2\pi} \quad (2.54)$$

Po úpravě dostaneme rovnice:

$$f_c = f k \frac{Q_2}{p} (1 - s) \quad (2.55)$$

$$f_c = f \left[ k \frac{Q_2}{p} (1 - s) \mp 2 \right] \quad (2.56)$$

Při splnění vrchních podmínek 2.49 a 2.50 můžou síly o kmitočtu  $f_c$  rozechvět stator, kmitočty sil jsou lineární funkcí skluzu a při určité hodnotě skluzu může dojít ke shodě s kmitočtem vlastních kmitů rotoru. V tomto případě dojde k interferenci a výraznému zesílení hluku. [11]

### Vliv drážkování rotoru

Harmonické vlivem drážkování rotoru a statoru mají stejný počet pólů a rychlosti jako příslušné stupňové harmonické, to znamená že nepřináší další kritéria pro vznik hluku.

V průběhu magnetického tlaku se vytvoří složka s počtem  $\ln r=0$ , pokud dojde k interferenci dvou harmonických, stejného řádu (magnetomotorické složky  $\times$  stejný s některým libovolným řádem magnetické vodivosti  $z$ ) a pokud-li mají rozdílné úhlové rychlosti ( $\omega_z \neq \omega_x$ ). [11]

Pokud-li chceme zapříčinit vzniku hluku, je potřeba vyhnout se těmto kombinacím:

$$Q_1 \mp p = Q_2 \quad (2.57)$$

$$Q_2 \mp p = Q_1 \quad (2.58)$$

Pokud-li na sebe působí stupňová harmonická statoru a drážkování rotoru, vznikne diferenční pole. Prostorový a časový průběh je dán diferenční rovnicí:

$$p_r = \frac{\mu_0}{4} H_{\Delta}^2 \{1 - \cos 2[(\omega \mp Q_2 \omega_R)t + (Q_2 - Q_1 \mp p)a]\} \quad (2.59)$$

Kde  $H_{\Delta}$  amplituda diferenčního pole

Nejhorší případ vzniku při předpokladu:

$$|Q_2 - Q_1 \mp p| = 1 \quad (2.60)$$

Síly s malým počtem prostorových vln vznikají po splnění předpokladu:

$$|Q_2 - Q_1| = p, p \mp 1, p \mp 2 \dots \quad (2.61)$$

Kmitočet v místě pod úhlem alfa určíme:

$$f_c = 2f \left[ \frac{Q_2}{p} (1 - s) \mp 1 \right] \quad (2.62)$$

Vznikají kmity nultého, druhého a čtvrtého řádu.

### **Vliv deformace vzduchové mezery**

Tento vliv se nejvíce projeví u motorů s užší vzduchovou mezerou, radiální síly působící na jeho statoru vytvoří deformaci, což způsobí deformaci vzduchové mezery. Nejvýznamnější jsou síly způsobené harmonickou magnetického pole řádu  $p$ . Vyvolaná deformace vzduchové mezery lze respektovat v průběhu magnetické vodivosti vzduchové mezery s členem obsahující harmonickou  $2p$ . Harmonické vznikající při oboustranném drážkování. [11]

$$q = Q_1 \mp 2p \quad (2.63)$$

$$\sigma = Q_2 \mp 2p \quad (2.64)$$

Při interakci harmonických magnetické vzduchové mezery se stupňovými harmonickými magnetometrického napětí řádu  $v$  a  $\mu$

$$v = Q_1 \mp p \quad (2.65)$$

$$\mu = Q_2 \mp p \quad (2.66)$$

Dochází ke vzniku radiální síly nízkého řádu, pokud-li jsou splněny tyto podmínky:

$$\zeta - \mu = t \quad (2.65)$$

$$v - \sigma = r \quad (2.66)$$

$$|Q_1 - Q_2| = 3p, 3p \mp 1, 3p \mp 2 \quad (2.67)$$

Další kritérium pro omezení hluku v situaci, kdy se ve stroji tvoří unipolární tok, magnetomotorické napětí je poté rozloženo rovnoměrně po obvodě a platí:

$$v = \mu = 0 \quad (2.68)$$

$$\xi = 0 \quad (2.69)$$

Radiální síly jsou v tomto případě zapříčiněny vznikem interferenci magnetické vodivosti

$$\rho - \sigma\sigma = r \quad (2.70)$$

Tyto kritéria jsou důležité u konstrukce 2 pólových motorů, kde se deformace projevuje nejvíce.

### 3. Typy zkoušek

Zkoušky asynchronních motorů dělíme na

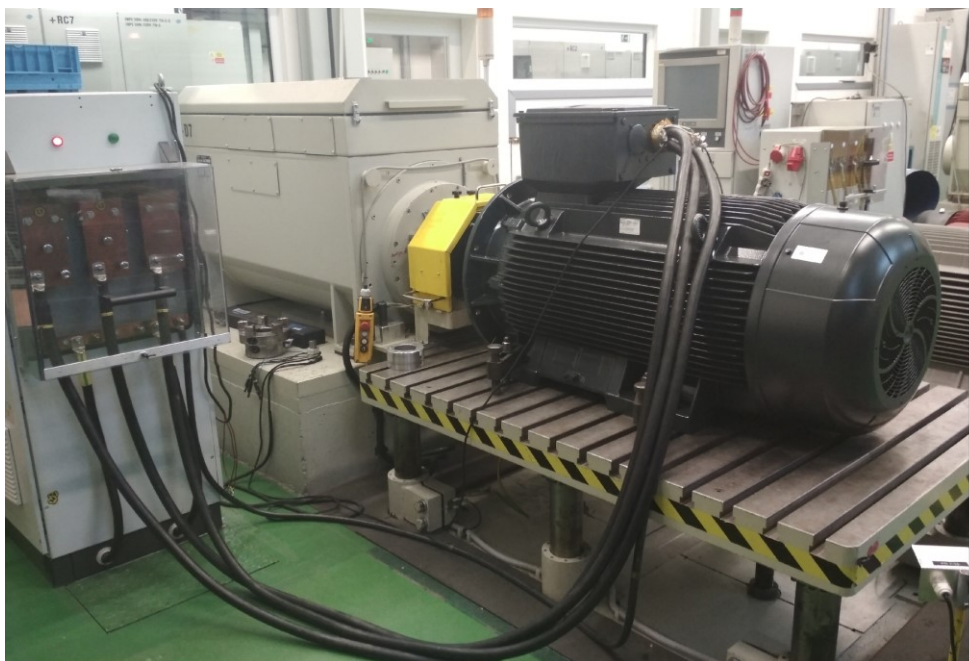
- Typové
- Kusové

#### 3.1. Typová zkouška

: IEC 60034

Do typové zkoušky patří:

- Měření odporu vinutí
- Měření na prázdkno
- Měření na krátko
- Pracovní charakteristiky
- Momentové charakteristiky
- Měření vibrací
- Měření hluku



Obrázek 25: Motor při typové zkoušce

#### Měření odporu vinutí

Provádí se Voltampérovou metodou při vychladnutém motoru, chladnutí motoru je dáno tepelnou konstantou zařízení, které souvisí s masou hmoty. Při nemožnosti měření teploty okolí se považuje teplota vinutí stejná jako okolní při doby chladnutí 5 hodin pro motory do 10kW, do 100 kW 8 h a nad tento výkon 16 hodin. Hodnota odporu se měří minimálně 3krát pro různé hodnoty proudu, při čemž

proud by neměl způsobit oteplení vinutí. Výsledné hodnoty se zprůměrují. Při konstrukci motoru, kdy konce vinutí jsou vyvedeny do svorkovnice, se měří každá fáze zvlášť. [13]

### **Měření naprázdno**

Tímto měřením zjišťujeme proud na prázdno, účinník na prázdno, ztráty mechanické a ztráty v železe. Tímto měřením lze stanovit náhradní prvky schématu příčné větve, tj.  $x_\mu$  a  $R_{fe}$ . Při chodu na prázdno je připojen na plné napětí a statorovým vinutím protéká zlomek jmenovitého proudu. Měření na prázdno by mělo být prováděno po záběhu ložisek, neboť ty ovlivňují hodnotu mechanických ztrát a následného výkonu  $P_0$  a proudu  $I_0$ . [13]

### **Měření nakrátko**

Při tomto měření můžeme stanovit prvky podélné větve  $X_\sigma$  a  $R$ . Dále zjistíme hodnoty proudu nakrátko  $I_k$ , ztrát nakrátko a účinníku nakrátko. Měření probíhá v ustáleném stavu, kdy rotor motoru je zabrzděn. Při zkoušce nakrátko se veškerá odebíraná energie přemění na ztráty, které následně způsobí oteplení stroje. Z důvodu velkých proudů tekoucích při zablokovaném rotoru při jmenovitém napětí se zkouška provádí s napětím sníženým. Velikost napájecího napětí volíme tak, aby proud nakrátko nepřesáhl jmenovitou hodnotu proudu. Počet měření se pohybuje mezi 6-8mi měření, které nesmí trvat dlouhou dobu, neboť by došlo ke změně odporu vinutí následkem změny teploty a zanesli by jsme do měření chybu. [13]

### **Zátěžová zkouška**

Tyto charakteristiky se určují postupnou změnou zátěže, při konstantním napětí a kmitočtu sítě, sledují se při tom veličiny: příkon, proud skluz, účinnost a účinník. Při měření by měl být motor zahřátý a postupuje se od nejvyššího zatížení k nejnižšímu. Tímto postupem se vyloučí chyba způsobená změnou odporu při změně teploty vinutí. Motor tak začíná na vyšším zatížení s vyšším oteplením a postupně chladne při snižování zátěže. [13]

### **Statická momentová charakteristika**

Měření provádí při sníženém napětí (o 50%) a výsledné hodnoty jsou přepočteny na jmenovité napětí. Toto snížené napětí udržujeme na konstantní hodnotě, motor zatížíme, až téměř do stavu nakrátko. A odečítáme hodnoty proudu a momentu, které poté přepočteme na jmenovitou hodnotu napětí. Motor postupně odlehčujeme a následně můžeme změřit pár bodů pro kontrolu, při jmenovitém napětí. Tímto postupem dosáhneme přesnějších hodnot pro měření při nízkých otáčkách, kdy motor na jmenovitém napětí se rychleji zahřívá vlivem nižší účinnosti chlazení. Postupným snižováním zátěže se dostáváme do stavu naprázdno, do stavu synchronního, kdy mechanické ztráty pokrývá dynamo a následně do generátorického chodu. [13]



### 3.2. Kusová zkouška

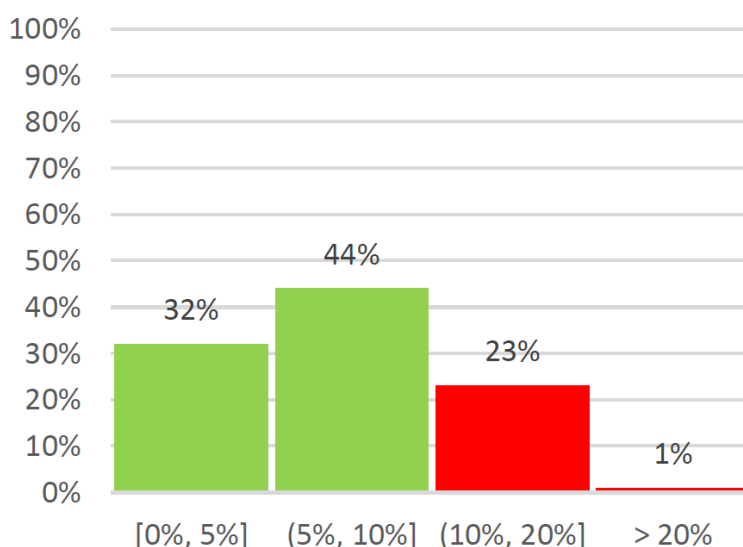
Jak už z názvu napovídá, této zkoušce je podroben každý motor, který opustí bránu závodu. Je to velmi krátká zkouška oproti zkoušce typové, cílem této zkoušky je potvrdit funkčnost motoru. V kusové zkoušce se měří:

- $R_{VIN}$  – odpor vinutí
- $R_{IZ}$  – izolační odpor
- $I_0$  – proud naprázdno
- $P_0$  – příkon naprázdno
- $U_k$  – napětí nakrátko
- $R_{TER}$  – odpor termočlánků
- Vibrace – vibrace pružné
- VN test – vysokonapěťová zkouška

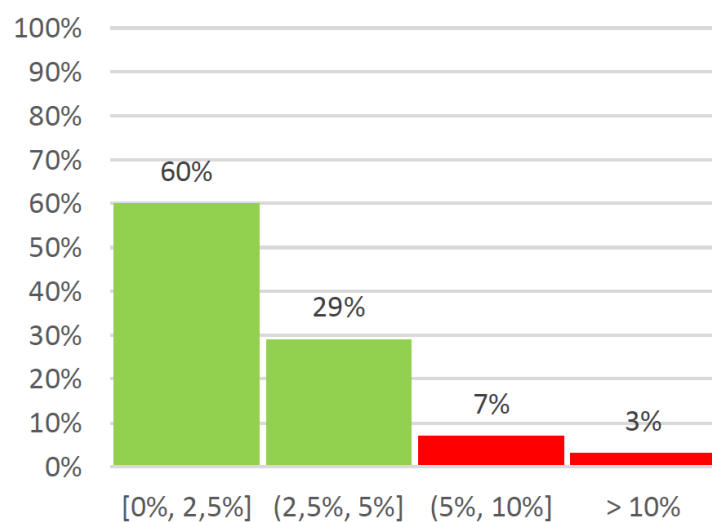
Pokud-li hodnoty naměřené při kusové zkoušce nebudou v souladu s hodnotami očekávanými, daný motor se pošle na předepsané další měření. V těchto měření může být obsaženo i měření dat pro analýzu statorového proudu, kdy můžeme zkoumat proudové spektrum.

Důvody proč změřené hodnoty nejsou takové, jako bychom očekávali nemusí být vždy vlivem výrobní nebo konstrukční vady. Neshody proudu na prázdnou můžou být způsobeny i vlivem nezaběhaných ložisek a tím zvýšení mechanických ztrát a proudu na prázdnou.

Na grafu obr.26 vidíme analýzu odchylky proudu naprázdno a na obr 26. napětí nakrátko při porovnání kusové zkoušky oproti typové. U typové zkoušky je proud naprázdno měřen po zaběhnutí ložisek, do tolerance 10% projde 76% měřených motorů, u měření napětí nakrátko takový problém nenastává, podmínky měření napětí nakrátko typová vs kusová zkouška jsou skoro totožné a tolerancí 10% procent bylo prošlo 89% motorů.



Obrázek 26 Analýza proudu naprázdno



Obrázek 27: Analýza proudu nakrátko

## 4.Zpracování měřených dat

Při hledání metodiky na odhalení poruch jsme se rozhodli pro vytvoření databáze z měřených dat. Po hlubším prozkoumání a zjištění možností dat, které jsou uloženy, jsem zjistil, že jediná uchovaná data, kterých je dostatečné množství, jsou záznamy proudů z oteplovací zkoušky. Tento záznam je 5vteřinový a jsou na něm uloženy data průběhů proudů snímané snímačem LEM, dále průběh proudu snímaný proudovým trafem a záznam napětí. Data jsou uloženy ve formátu stream, což je 14ti kanálový průběh, uložen měřicím programem na bázi NI Labview.

Labview je jeden z možných programů pro práci s průběhy a následnou analýzu, jelikož je program zkušebny stejného výrobce je zaručená kompatibilita.

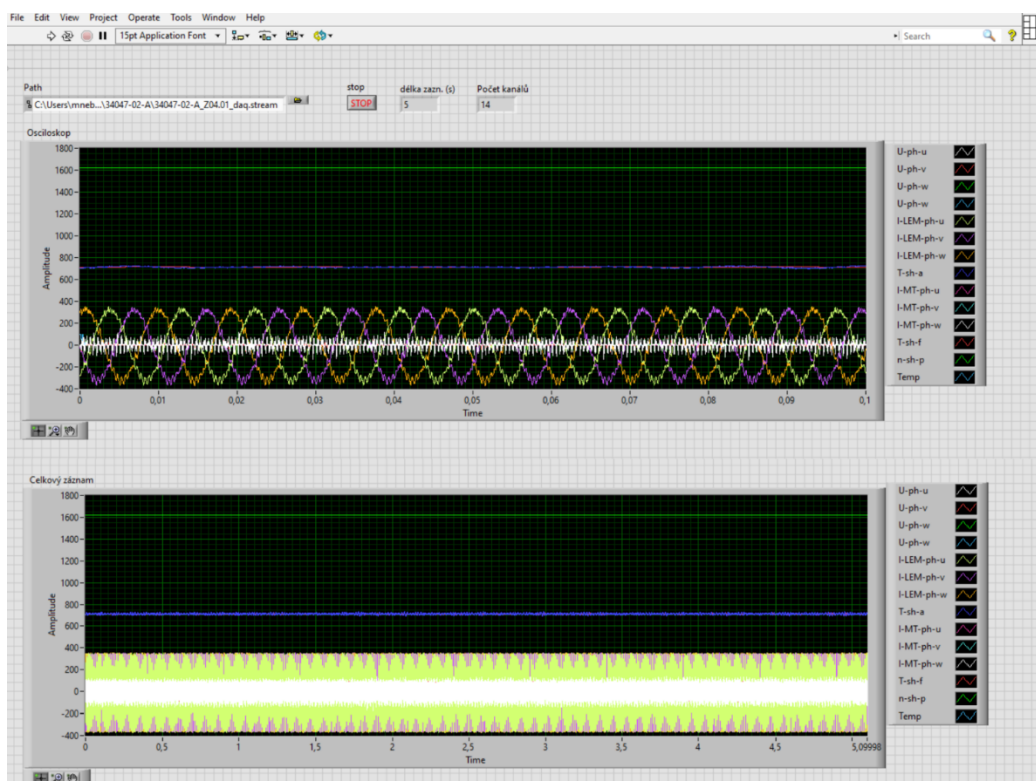
Zkratka Labview se skládá z anglického Laboratory Virtual Instruments Engineering Workbench, je grafické vývojové prostředí vytvořené firmou NI – National instruments. Tato firma je lídrem v oblasti virtuální instrumentace. Tento program je zaměřen především na vytváření aplikací v oblasti sběru analýzy a vizualizaci dat. Aplikace jsou vytvářeny pomocí grafického programování. [14]

Pracovní prostředí je rozděleno do dvou oken:

- Okno uživatelského rozhraní – Front panel
- Okno blokového diagramu – Block diagram

### Front panel

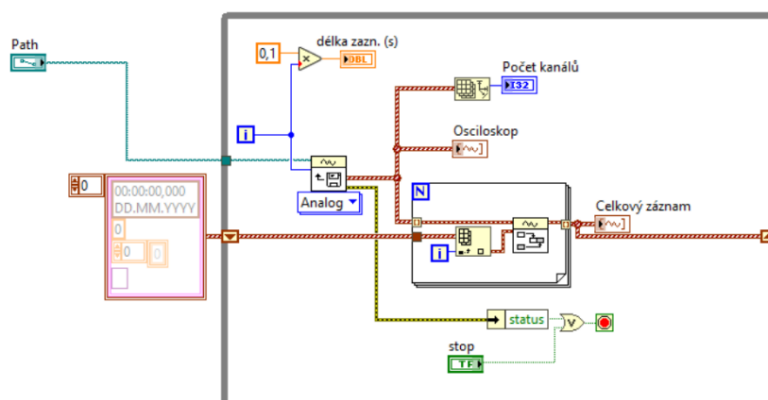
Je to část aplikace, kterou vidí uživatel. Měla by to být část, která je intuitivní a umožňuje uživateli přehledné ovládání celé aplikace, zobrazení a vizualizaci potřebných dat. Přední panel tvoří prvky, které můžeme rozdělit na vstupy a výstupy. Mezi vstupy se řadí prvky, které zasahují do ovládací struktury programu, proto je nazýváme ovladače (např. posuvný, textový či číselný ovladač, nebo knoflík). Výstup zobrazuje data, které jsme prostřednictvím vstupů zadali ke zpracování. Mohou to být různé indikátory, grafy či imitace ručičkových přístrojů. Na čelním panelu je také zobrazena nástrojová lišta, která umožňuje program spouštět po cyklech – funkce run, nebo spustit v módu nekonečného cyklu – run continuously, poté můžeme přerušit běh programu – stop, nebo zobrazit chybové hlášky.



Obrázek 28: Příklad Front panelu čtečky formátu stream

## Block panel

Definuje vlastní program, propojuje a definuje funkce prvků front panelu. Prvky blokového diagramu se dělí na vstupy – řídicí terminály, výstupy – zobrazovací terminály a uzly. Uzly se dále dělí na funkce struktury a SubVI. Funkce si můžeme představit jako bloky logických funkcí jakou jsou např. sčítání. SubVI je podprogram daného programu, můžeme si ho představit jako smyčku while, nebo forcyklus.



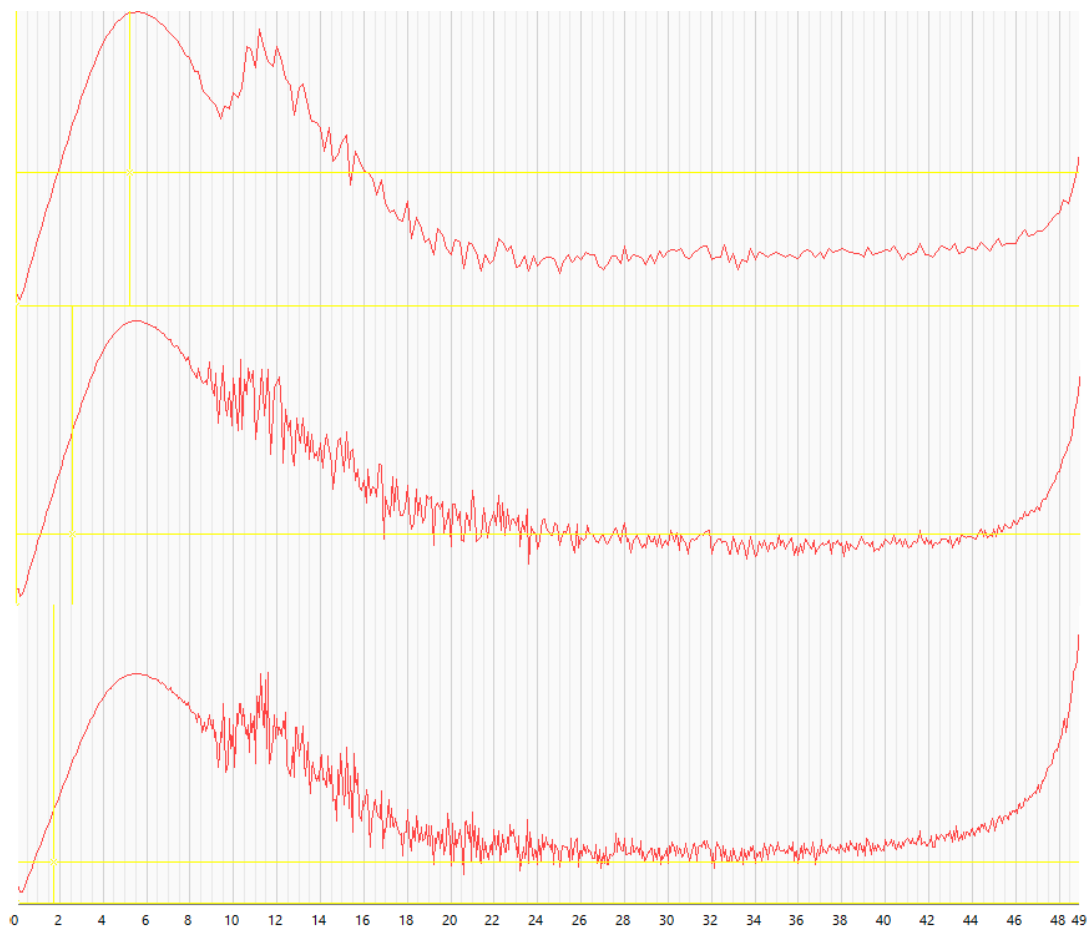
Obrázek 29: Příklad Block panelu čtečky formátu stream

## App Data viewer

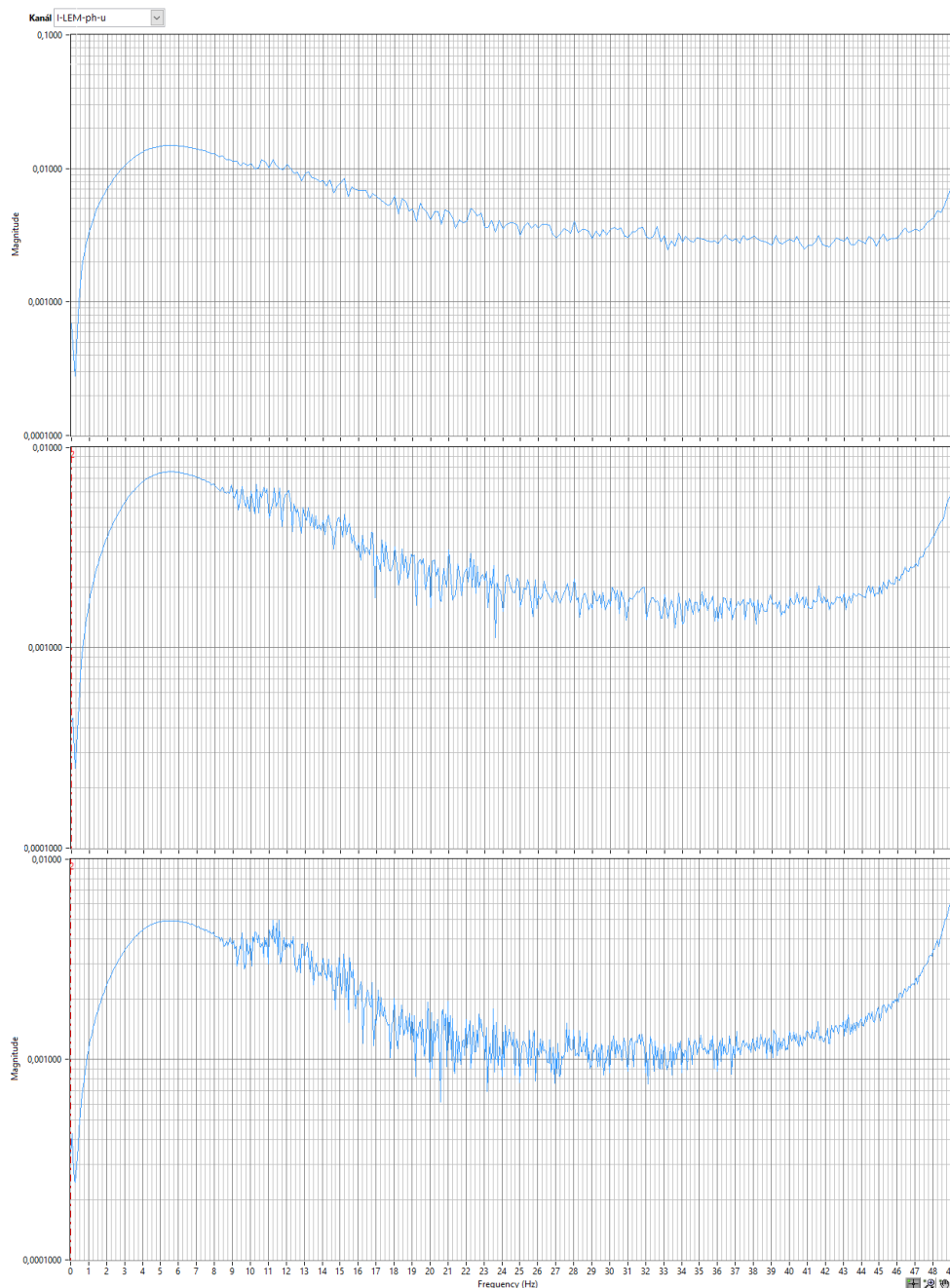
Je to aplikace, kterou jsem použil na zpracování dat z měření. Tato aplikace pracuje na bázi Labview a byla vyvinuta společností Elcom. Její prostředí umožní zobrazení libovolného průběhu a následnou FFT analýzu dat.

### Volba délky záznamu

Pro budoucí měřené a ukládané záznamy je důležitým parametrem délka záznamu, který se bude ukládat, proto jsem udělal krátkou analýzu vlivu délky signálu na zobrazení frekvenčních spekter, zobrazované spektrum jsem nastavil mezi 1-49 Hz, měřený motor je spuštěn na 50 Hz, kdybych provedl zobrazení 50 Hz složky, tak by se zobrazovaný rozsah přizpůsobil velikosti 50 Hz, který dominuje jsou velikostí.



Obrázek 30: Lineární zobrazení frekvenčního spektra pro záznam 5,10 a 15s.



Obrázek 31: Logaritmické zobrazení frekvenčního spektra pro záznam 5,10 a 15s

Následující grafy ukazují volbu délky záznamu, v každém grafu jsou zobrazeny 3 průběhy, v první trojici je použité zobrazení na svisle ose lineární, v případě druhého grafu je použité logaritmické zobrazení hodnot svislé osy. V každé trojici grafu jsou obsaženy průběhy s délkou analyzovaného záznamu 5s, 10s a 15s. Průběhy jsou totožné jen je softwérově využít pro Fourierovu transformaci pouze daný časový úsek. Z pohledu analýzy a zobrazení průběhů by bylo nejlepší volit co nejdelší časový úsek, čím delší časový úsek tím máme lepší frekvenční rozlišení Fourierovy transformace.

Rozlišení lze vypočítat:

$$d_f = \frac{1}{t_z} \quad (4.1)$$

Kde  $t_z$  čas záznamu

Pro uvedené grafy dosadíme:

$$d_{f1} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ Hz} \quad (4.2)$$

$$d_{f2} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ Hz} \quad (4.3)$$

$$d_{f3} = \frac{1}{15} = 0,0\bar{6} \text{ Hz} \quad (4.4)$$

Záznam je pořízen se vzorkovací frekvencí 50k samples/sec. Problém dlouhých záznamů pro naše použití má zásadní problém při uložení těchto souborů na serveru. Použitý datový soubor formátu stream má pro 5s. záznam přibližně 25 Mb. Velikost záznamu s délkou lineárně roste, proto soubor o délce 15 s zabírá kapacitu přibližně 75 Mb, experimentovalo se i se soubory délky jedné minuty, které měli kolem 300 Mb. Jeden z problémů je vytíženost servu, co se týče potřebné velikosti pro ukládání záznamů z měření, druhá je následná práce se soubory. Při práci s aplikací Appdataviewer se nelineárně prodlužuje načítací čas a následné výpočty. Také uvažujeme s tím, že uživatel nebude každý průběh stahovat ze serveru do počítače, ale bude z výchozí složky na serveru načítat přímo do programu, tím se klade větší náročnost na rychlost sítě. Proto je důležité se následně zamyslet nad touto problematikou. Mezi možné řešení ke snaze prodloužit záznam je buď snížit vzorkovací frekvenci, nebo ukládat pouze průběh proudu z kanálů měřeným pomocí čidel LEM, záznam z proudových traf není tak věrohodný a k diagnostickým účelům nepotřebujeme ani záznam napětí. Průběh vibrací o délce 5s má při vzorkovací frekvenci 12,8k samples/sec velikost 3,5 Mb.

## 5. Vytvoření databáze a metodiky vyhodnocení

Pro vytvoření databáze jsem si vybral prostředí MS office, konkrétně tabulkový editor excel. Zvolil jsem tento software kvůli dostupnosti a rozšířenosti ve firmě. Ovládání je intuitivní a pro většinu lidí známé. Pro snadnější vizualizaci a práci s daty jsem zvolil databázový nástroj kontingenční tabulka. Nevýhodou tohoto nástroje je omezený počet sloupců ve funkci, proto je nutné tento nástroj využít pouze pro filtraci potřebných parametrů v našem případě konstrukční parametry a jiné. Dané hodnoty frekvenčních spekter je potřeba uložit zvlášť a využít k jejich načtení databázové vzorce.

Kontingenční tabulka: Nástroj na zpracování a vizualizaci dat

Histogram: Vyjadřuje četnost sledované veličiny v daném rozsahu

Databáze obsahuje 334 záznamů FFT analýzy statorového proudu, každé ze 3 fází za uplynulé roky 2019 a 2020. Je tvořena Listy:

- Ovládací panel
- Analýza nesymetrie
- Analýza poruchových frekvencí
- Konstrukční parametry
- Data FFT
- List sloužící pro import z Labview
- List sloužící pro usnadnění vkládání dat
- List sloužící pro selektování informací o dané zkoušce

Listy ovládací panel, analýza nesymetrie a analýza jednotlivých frekvencí můžeme nazvat jako listy uživatelské, které postačí pro analýzu a zobrazení vzorků, zbylé listy slouží pro rozšiřování databáze o další měření.

### Ovládací panel:

Je to titulní hlavní list, prostřednictvím tohoto listu můžeme vyfiltrovat potřebný vzorek, který chceme analyzovat, máme na výběr filtru prostřednictvím typové zkoušky (Oranžové pole), pomocí specifikace vinutí (šedé pole), hlavních parametrů (pole modré) a v poslední řadě konstrukčních parametrů (zelené pole). Přes žluté pole je možné vybrat protistranu ke srovnání.

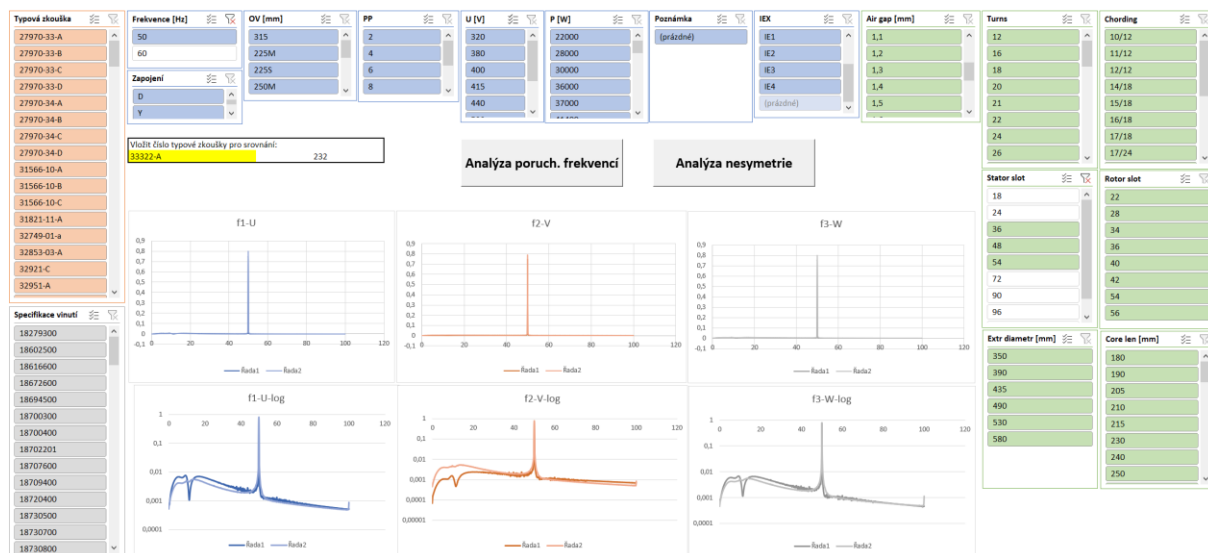
Popisky grafů:

- Řada1 – Zobrazuje průměrné hodnoty ze skupiny měření, které jsme pomocí filtrů zvolili
- Řada2 – Zobrazuje vždy hodnoty z jednoho měření, které jsme vložili do žlutého pole

Uprostřed ovládacího pole jsou umístěny 2 tlačítka usnadňující přesun na listy, které jsou určeny pro uživatele.



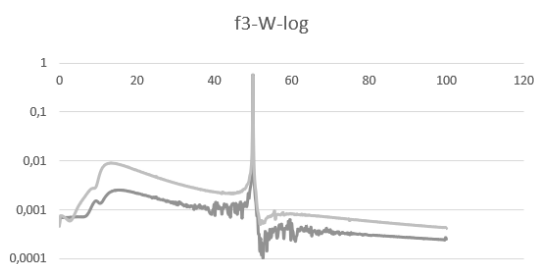
Filtry jednotlivých parametrů lze libovolně mezi sebou kombinovat, tím se zvyšují kritéria, které musí daný vybraný soubor měření splňovat. Vybrat můžeme jen jednu hodnotu, jako například na obr.č. 32. je aktivován filtr Frekvence [Hz]: 50, nebo v jednom filtru i více možností podržením klávesnice Shift a následnému výběru klikem, ukázka na filtru Stator slot [36,48,54]. V případě frekvence je nutné volit buď 50 Hz nebo 60 Hz.



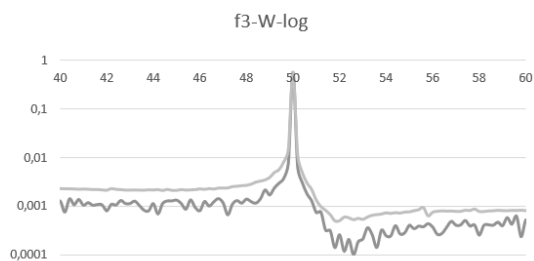
Obrázek 32: Titulní strana

Zobrazit můžeme průběhy také bez režimu porovnávání, pokud-li nevyplníme žluté pole pro měření, které chceme porovnat, zobrazí se pouze průměry vybraných měření zohledňující filtry.

Můžeme také zobrazit porovnat 2 různé průběhy. Např: výběr motoru u kterého došlo k mechanické úpravě: změna ventilátoru a sejmutí těsnících kroužků:



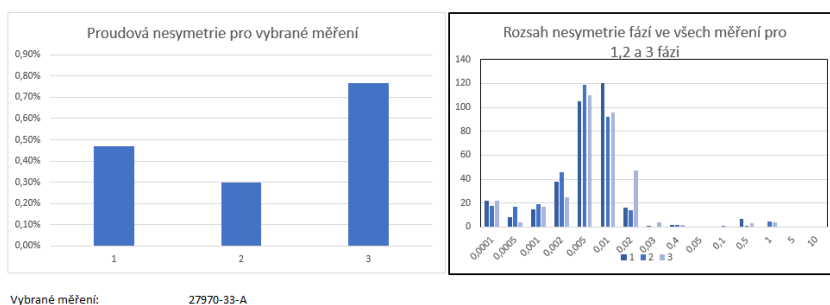
Obrázek 33: Konstrukční změna 40-60 Hz zobrazení



Obrázek 34: Konstrukční změna 0-100 Hz zobrazení

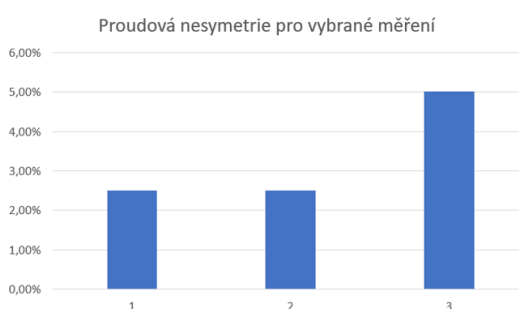
## Analýza nesymetrie

Tento list obsahuje grafické znázornění nesymetrie a dále histogram znázorňující obvyklé hodnoty nesymetrie. Dále jsem přidal tlačítko pro návrat na hlavní list.

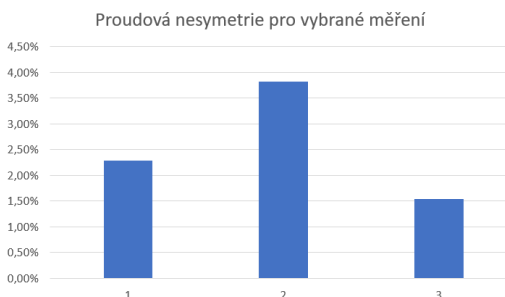


[Zpět na přehled](#)

Obrázek 35 Histogram nesymetrie



Obrázek 36: Motor s nesymetrií zapojení Y

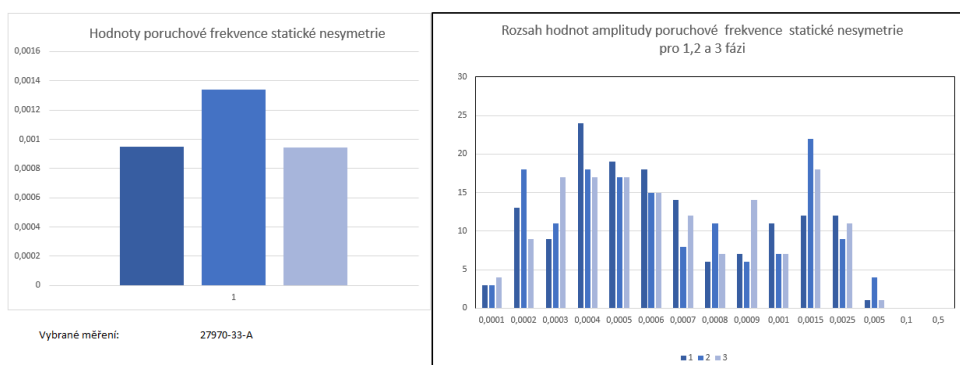


Obrázek 37: Motor s nesymetrií zapojení D

Na obrázku č. 35 můžeme vidět v jakých hodnotách se pohybují rozdíly mezi fázemi. Histogram má na svislé ose četnost výskytu a na vodorovné vyskytovanou hodnotu. Tzn. nejčastější diference je 0,005 % u druhé fáze a 0,01 % u fáze první, s četností výskytu 120 vzorků tj zhruba 1/3 použitých. Když se podíváme na obr. Č.37 a č.36, tak zjistíme, že se pohybujeme v případě nesymetrie se zapojení do Y kolem hodnot 2,5-5 %, při čemž sledujeme nejvyšší hodnotu tj. 5% a v případě zapojení do D jsme na hodnotě 3,8%. Tyto hodnoty spadají v histogramu na obr. č. 35 do kategorie 5 %, ve které se nenachází žádný vzorek z 332 vzorků zahrnuté do této analýzy nesymetrie.

## Analýza poruchových frekvencí

Tento list funguje obdobně jako předchozí, ale hodnoty zobrazené v histogramu jsou proměnné a interpretují průměr hodnot vybraných měření pomocí filtrů na titulním listu.



[Zpět na přehled](#)

Obrázek 38: Zobrazení rozsahu hodnot poruchových frekvencí

U histogramu není nutné nastavovat filtr buď na 50 Hz, nebo na 60 Hz, je možná i kombinace, neboť je vypočtena a přiřazena vždy konkrétní poruchová frekvence pro konkrétní napájecí frekvenci dle vzorce:

$$f_{st} = 2 \cdot f_1 - \frac{f_1}{2} \quad (5.1)$$

Pro 50 Hz:

$$f_{st} = 2 \cdot 50 - \frac{50}{2} = 75 \text{ Hz} \quad (5.2)$$

Pro 60 Hz:

$$f_{st} = 2 \cdot 60 - \frac{60}{2} = 90 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

## Data FFT

Tento datový list je stěžejním listem tohoto excelu a propojuje ostatní listy. Data FFT průběhu proudů všech 3 fází se do tohoto listu vloží přes pomocný list, grafy Labview a podobných programů umožňují export do excelovské tabulky. Pokud si nastavíme konstantní parametry pro zobrazení grafu v Labview, tak výsledný export dat je vždy ve stejném formátu. Tohoto faktu jsem využil a sestavil řetězec vzorců, který vyhledá proudové průběhy z čidel LEM a vloží je do přehledného řádku. Vygenerovaný excel programem Labview totiž obsahuje všech 14 průběhů, které zpracoval z 14 kanálového průběhu typu stream. Tento přehledný řádek si vložíme do listu Data FFT, takže v této fázi postupu obsahuje každý řádek FFT průběhy 3 fází a číslo měření.

Každé měření má průvodní excel, který obsahuje číslo měření a specifikaci vinutí, který byl měřen. Tento excel načteme do listu Data FFT pomocí druhého pomocného listu, který funguje na stejném principu. V této fázi už víme, k jakému měření patří, jaký konkrétní motor. Následující pomocný list obsahuje typy motorů podle specifikace vinutí a jejich konstrukční parametry. V listu Data FFT tedy v této fázi máme údaje o měření, průběh měření a číslo motoru. Pomocí databázových funkcí excel dohledá v listu konstrukčních parametrů daný typ motoru, a zobrazí v listu Data FFT konstrukční parametry motoru.

Poslední prvek excelu je samotná kontingenční tabulka, ta zobrazí typ měření a konstrukční parametry. Podle typu měření se vyhledají hodnoty daného měření přes databázové funkce (Zvolil jsem funkce pozvyhledat: vrátí hodnotu řádku požadovaného zobrazí v grafech titulních listů).

## **Závěr**

Téma této práce je vytvořit metodiku při kusové zkoušce, která by odhalila možné poruchy. Tato zkouška by neměla být časově náročná. Nastavená metodika vyhodnocení, podle limitu hodnot, plní svůj účel a nevyhovující kusy jsou posílány na podrobnější vyhodnocení a zkoumání.

Cílem této práce bylo zjistit možnosti využití historických dat pro možnosti diagnostiky. Z historických dat jsem použil jediná vhodná data, a to je 5ti sekundový záznam průběhu statorového proudu naměřený na konci oteplovací zkoušky. Po podrobné simulaci jsem zjistil, že takto krátký průběh lze využít pro porovnání konstrukčně identických motorů, ale pro výpočet dílčích poruchových frekvencí je nevhodný. Při prodloužení záznamu na 3násobek, tudíž 15s, lze pozorovat lepší vyobrazení proudového spektra.

Vytvořená databáze je také vhodná pro porovnání a odhalení proudové nesymetrie, která lze zjistit i pouhým změřením proudu jednotlivých fází. V případě zapojení vinutí do hvězdy se nám proudy vyvolané nesymetrií rozloží do jednotlivých fází a jejich detekce je složitější. V případě proudového spektra vidíme zřetelně nesymetrii v obou zapojení.

Při zpracování velkého množství dat, jsem musel vytvořit funkci na eliminaci vložení špatného průběhu. Jednotlivé průběhy jsou filtrovány podle jmenovité frekvence, ale někdy je motor měřen i na jiné frekvenci, než je jmenovitá. Případná neshoda průběhu s jeho popisem a prohození např. 50 Hz a 60 Hz průběhu vytvářejí chybu ve výpočtu poruchových spekter, které se odvíjí od napájecí frekvence a následná data jsou zkreslená.

Výsledná tabulka bude sloužit pro zrychlení a zjednodušení vyhodnocení případných poruch motoru na zkušebně firmy Siemens, s. r. o., odštěpný závod Elektromotory Frenštát.

## Literatura

- [1] KARMAR, S. – CHATTOPADHYAH, S. – MADHUCHANDA, M. – SENGUPTA S. *Induction Motors Fault Diagnostic*. ISBN 978-981-10-0624-1 (eBook)
- [2] *Winding Damages*, [Cit 2021-04-28] Dostupné z: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb6/h29/WEG-winding-damages-single-phase-motors-50041274-brochure-english-web.pdf>
- [3] CHMELÍK, K. – ČECH, V. – BERNÁT, P.: *Namáhání asynchronních motorů při napájení z měniče frekvence*. [Závěrečná zpráva k úkolu GAČR č.: 102/96/0815.]
- [4] JUNG, Jee-Hoon, Jong-Jae LEE, Bong-Hwan KWON a Chuck YUNG. Online *Diagnosis of Induction Motors Using MCSA*. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics [online]. IEEE, 2006, 2016, 53(6), s. 1842-1852 [cit. 2021-28-04]. ISBN 978-1-4799-8397-1 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4016382>
- [5] HORENSKÝ, Kamil. *Možnosti využití diagnostiky poruch asynchronních motorů*. Ostrava. 2017 Diplomová práce. Vysoké škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce ČECH Václav.
- [6] JAKSCH, I. *Metody diagnostiky indukčních motorů*. Elektro [online]. [Cit 2021-04-28]
- [7] *Isolated current and voltage transducers Characteristics – Applications – Calculations 3rd Edition*, [online], 2006 [cit. 2021-28-04] [www.lem.com](http://www.lem.com) dostupné [https://www.lem.com/images/stories/files/Products/P1\\_5\\_1\\_industry/CH24101E.pdf](https://www.lem.com/images/stories/files/Products/P1_5_1_industry/CH24101E.pdf)
- [8] KARBAN, Pavel. *Rychlá Fourierova transformace*. Elektro [online]. [Cit 2021-04-28] Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~panek50/TEVS/12\\_prednaska.pdf](http://home.zcu.cz/~panek50/TEVS/12_prednaska.pdf)
- [9] LIŠKA, Jindřich. *Zpracování signálu pro diagnostiku a jeho aplikace*. Elektro [online]. [cit 2021-04-29] Dostupné z: [http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA\\_08\\_1012.PDF](http://www.crr.vutbr.cz/offline/SYSTEM/FILES/BROZURA_08_1012.PDF)
- [10] ZUTH Daniel, VDOLEČEK František. *Měření vibrací ve vibrodiagnostice*. Elektro [online]. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [11] HUDECZEK, Mečislav. *Diagnostika elektromotorů*. ELEKTRO [online]. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://www.hudeczek.cz/know-how>
- [12] MADEJEWSKI, B. *Hluk elektrických točivých strojů*. ELEKTRO [online]. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <http://www.hlukovekryty.cz/?info=clanky-o-hluku&clanek=hluk-elektrickyh-stroju-tocivych>
- [13] HRABCOVCOVÁ, V., RAFAJDUS, P., FRANKO, M. A HUDÁK, P. Jiří, *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 2009. ISBN 978-80-8070-924-2
- [14] WITTASSEK, Tomáš. *Virtuální instrumentace I*. Ostrava, 2012. Studijní materiál. Vysoké škola báňská – Technická univerzita Ostrava
- [15] CHMELÍK, K. – MIŠÁK, S. – ZÁLIŠ, K. – CHMELÍK, K: *Technická diagnostika na elektrických zařízeních*. Ostrava: skriptum VŠB.